

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka
Juha Toivonen

Opinnäytetyö

Hallikehien hintavertailu käyttäen puurungon sormiliimaliitoksia

Työn ohjaaja
Työn tilaaja
Tampere 5/2010

Raimo Koreasalo DI
Tuomo Poutanen Dosentti, TkT

Tekijä	Juha Toivonen
Aihe	Hallikehien hintvertailu käyttäen puurongon sormiliimaliitoksia
Sivumäärä	38 sivua + 24 liitesivua
Päiväys	5/2010
Työn ohjaaja	DI Raimo Koreasalo, Tampereen ammattikorkeakoulu
Työn Tilaaaja	TkT, Dosentti Tuomo Poutanen

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä vertaillaan sormiliimaliitostekniikalla toteutettujen puisten, ristikkorakenteisten kehien kustannuksia vastaaviin teräsrakenteisiin kehiin. Sormiliimaliitos on uusi puun liitostekniikka, jonka avulla saadaan jäykkiä liitoksia ja voidaan liittää erikokoisia poikkileikkauksia toisiinsa. Liitos soveltuu hyvin käytettäväksi kyseisissä ristikkorakenteisissa kehissä. Vertailussa on käytetty kolmea erilaista, erikokoista ja tyyppillistä kehärakennetta. Samalla on tutkittu myös kehävälin ja kehän geometrian vaikutuksia kustannuksiin tämän tyyppisissä rakenteissa. Vertailun perusteena on käytetty puun kuutiohintaa 500 €/m^3 ja teräksen kilohintaa 2 €/kg .

Vertailun tulokset osoittivat, että kaikissa vertailun tapauksissa puiset kehät tulivat edullisemmiksi ja näin ollen ovat erittäin kilpailukykyisiä rakenteita, teräksisiin kehiin verrattuna.

Writer	Juha Toivonen
Thesis	Price comparison of frame structures using timber frames with glued finger joints
Pages	38 pages + 24 appendices
Graduation time	5/2010
Thesis supervisor	M.Sc Raimo Koreasalo, Tampere University of Applied Sciences
Co-Operating company	Dr. Tech., Docent Tuomo Poutanen

ABSTRACT

In this thesis timber frame truss structures with glued finger joints and similar steel made frames costs were compared. Glued finger joint is a new jointing technique for wooden members. It is a completely rigid joint that allows attaching different wooden members, of different sizes, together easily. These joints suit very well frame truss structures compared in this thesis. Comparison was made using three different, but common, frame structures with different spans. Comparison was also made with different frame geometry and using different clearance between frames. Prices used as a basis of comparison in this thesis were 500 €/m³ for timber structures and 2 €/kg for steel structures.

In conclusion the results of the comparison indicate that in all of the cases in this comparison the timber frame structures were cheaper and therefore highly competitive structures compared to the steel made frame structures.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	5
2 Sormiliimaliitokset.....	6
3 Teoreettinen tausta	9
3.1 Puu materiaalina.....	9
3.2 Ristikkosuunnittelun periaatteita	10
3.2.1 Yleistä	10
3.2.2 Laskentamallit.....	11
3.2.3 Ristikkorakenne	11
3.2.4 Kehärakenne	12
3.2.5 Kehärakenteen mallintamisperusteita	13
3.3 Mitoitus	13
3.3.1 Yleistä mitoituksesta	13
3.3.2 Murtorajatilamitoitus	14
3.3.3 Käyttörajatilamitoitus	15
3.3.4 Materiaaliominaisuudet.....	15
3.3.5 Kuormitukset.....	16
4 Vertailuasetelma	17
4.1 Vertailun hallikehät	17
4.2 Kuormitusyhdistelmät ja kuormitukset.....	19
4.3 Kehien mitoitus tässä työssä	21
4.3.1 Teräs	23
4.3.2 Puu	23
4.3.3 Mitoituspohja	23
4.3.4 Momenttikuviot.....	25
5 Vertailu	27
5.1 Vertailu halleittain	27
5.1.1 Halli 1.....	27
5.1.2 Halli 2.....	29
5.1.3 Halli 3.....	30
5.2 Ristikkorakenteiden hinnan muodostuminen.....	31
5.3 Hintavertailun laskelmat	31
6 Johtopäätökset ja lopputulos	35
Lähteet.....	37
Liitteet	38

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö liittyy Tuomo Poutasen tutkimiin sormiliimaliitoksiin. Työn tarkoituksena oli selvittää sormiliimaliitoksilla toteutetun hallin ristikkokehärakenteen kustannuksia verrattuna vastaavan teräsrakenteisen kehän kustannuksiin.

Monet teollisuuden hallit, varastohallit ja PVC -katetut hallit tehdään teräsrakenteisina, koska ei ole ollut kilpailukykyistä vaihtoehtoa. Uuden sormiliimaliitostekniikan myötä on tullut mahdolliseksi edullisesti toteuttaa järeämmästä puutavarasta koottuja ristikkorakenteita, jotka soveltuvat hyvin suuremmille kuormille ja pidemmille jänneväleille.

Työssä on perehdytty myös ristikkorakenteisten hallikehien toimintaan ja mitoittukseen. Työn aikaa vievin osuus onkin erilaisten ristikkorakenteiden suunnittelu, mallintaminen sekä itse kehien sauvojen mitoittaminen. Kehärakenteiden optimointiin voisi myös helposti käyttää huomattavasti enemmän aikaa, mutta yksittäisen kehän kustannusten minimointi ei palvele kokonaiskustannusten vertailussa tarvittavien tietojen keruuta. Kehien malleissa olisikin vielä paljon parannettavaa. Vertailtavien hallien geometria on pyritty pitämään mahdollisimman samankaltaisena, jotta rakenteet pysyvät vertailukelpoisina, ja näin ollen saadaan luotettava vertailutulos.

Rakenteellisen toiminnan lisäksi kustannukset ovat avainasemassa hallien runkoa valittaessa. Tämän opinnäytetyön tulokset kertovat sormiliimaliitoksella toteutettujen puurakenteiden mahdollisuuksien laajuudesta hallirakentamisessa.

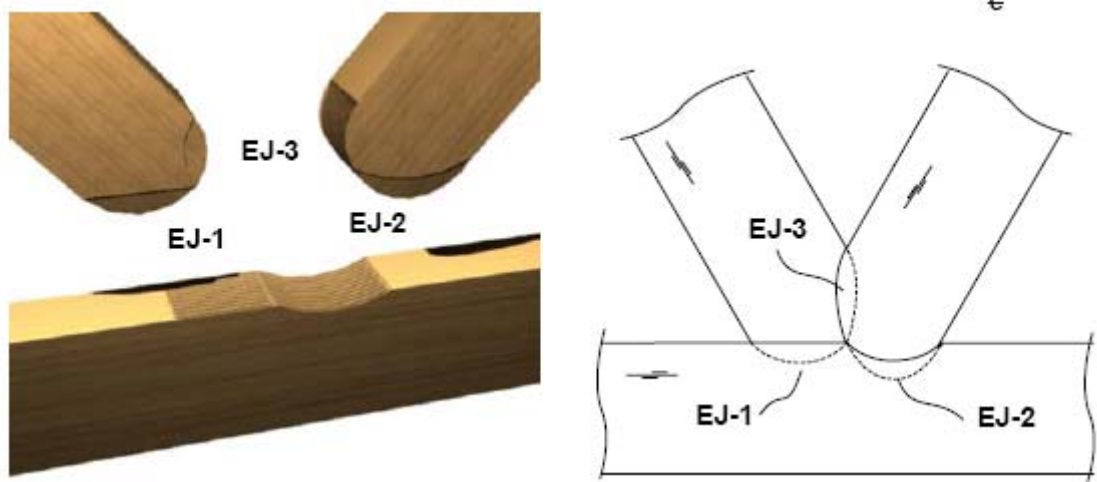
2 Sormiliimaliitokset

Sormiliimaliitos on Tuomo Poutasen tutkima uusi yleispätevä liitostyyppi puun liittämiseen. Liitos soveltuu kaikkiin puutuotteisiin joissa liitosten täytyy olla vahvoja, visuaalisia ja halpoja. Kuvassa (1) on esimerkki visuaalisesta T-sormiliitoksesta.



Kuva 1. T-sormiliitos (Poutanen 2009)

Aiemmin sormiliitoksia on käytetty rakennesahatavaran jatkamisessa ja liimapuisten kolminivelkehien nurkkaliitoksissa, joiden valmistaminen oli kuitenkin kallista ja tuhlassi puuta. Uusi yleispätevä sormiliimaliitos mahdollistaa liitoksen käytön kaikissa kulmasormiliitoksissa, kuten T, K, L ja E-liitoksissa ja tavallisissa I-liitoksissa. Kuvassa (2) on esimerkki K-liitokseen jyrskyistä sormista ja alkeisliitoksista. Liitos kantaa normaali-, leikkaus-, ja momenttikuormia. Aikaisemmin ei ole ollut puuliitosta, joka kestäisi momenttirasituksia, mutta liimaamalla tehty liitos on täysin momenttijäykkä. Momenttijäykät ja liikkumattomat liitokset pienentävät mitoitettavien sauvojen poikkileikkauksien kokoa sekä pienentävät rakenteen taipumaa. Liitos sallii rakennesuunnittelijan liittää eri poikkileikkausprofiileja toisiinsa vaivattomasti. Tämä lisää huomattavasti suunnittelijan mahdollisuuksia rakenteen geometrian valintaan ja mahdollistaa siten myös halvempia rakenteita. Nämä seikat tekevätkin liitostekniikasta erittäin käyttökelpoisen ja kilpailukykyisen monissa erilaisissa rakenteissa. Sormiliimaliitosta onkin luonnehdittu samanlaiseksi innovaatioksi puuliitosteknologiassa, kuin hitsaus on ollut metalliliitosteknologiassa.



Kuva 2. K-sormiliitos ja alkeisliitokset EJ-1, EJ-2 ja EJ-3 (Poutanen 2009)

Sormiliimaliitoksen kehittelyn on osaltaan mahdollistanut puuliimauksen kehittyminen. Puuliimaus on aikaisempaa halvempaa ja luotettavampaa, koska:

- liimojen kovettumisajat ovat lyhentyneet.
- liimat ovat aikaisempaa täyttävämpiä ja toimivat, vaikka liimapinnoissa olisi rakoja.
- liimapuristuksessa vaaditut paineet ovat pienentyneet.
- märän puun liimaus ja ristiliimaus, jossa syysuunnat ovat toisiinsa nähden kulmassa, on tullut mahdolliseksi.

Sormiliimaliitostekniikalla voitaisiin valmistaa kaikki puiset ristikkorakenteet, joita nykyään toteutetaan naulalevytekniikalla. Sormiliimaliitoksilla tehdyillä ristikoilla on monia etuja verrattuna naulalevytekniikalla tehtyyn vastaavaan ristikkoon.

Liimaliitoksilla tehty ristikko on edullisempi, koska rakenteessa tarvittavan puun tilavuusmäärä pienenee momenttijäykkien liitosten myötä. Liimalla tehty liitos on halvempi kuin naulalevyillä tehty. Naulalevyristikoissa ylä- ja alapaarten koot, yhdessä liitosten kanssa, määräävät diagonaalien koot. Sormiliimaliitostekniikalla näin ei ole, vaan on mahdollista liittää erikokoisia puukappaleita toisiinsa. Sormiliimaliitoksin tehtävän ristikon valmistuksessa ei materiaalihukkaa tule käytännössä lainkaan, koska lyhyempiä kappaleita voidaan jatkaa samalla liitostekniikalla ja käyttää siten uudelleen rakenteessa. Liitokset ovat visuaalisia, sillä itse liitokseen ei jää näkyviä sormia liitoksen ulkopuolelle. Naulalevyristikoiden palonkesto on huono, koska kuumuuden noustessa

naulalevyt menettävät lujuutensa nopeasti ja rakenne rikkoontuu. Sormiliimaliitos taas palaa ja hiiltyy liimoineen samalla tavalla kuin pelkkä puukin, joten liitos on paloturvallisempi. Kosteissa olosuhteissa liitosta voidaan käyttää samoin edellytyksin kuin puuta muutenkin. Ristikon mitoituksessa taipuman osoittautuessa määrääväksi tekijäksi, sormiliimaliitoksen liikkumattomuus pienentää taipumaa, jota naulalevyristikoissa olisi kompensoitava kasvattamalla sauvojen poikkileikkausten kokoa.

Sormiliitostekniikalla voidaan valmistaa myös sellaisia rakenteita, joihin naulalevytekniikka ei sovellu. Tällaisia rakenteita ovat muun muassa:

- Hyvin matalat ristikot, bumerangipalkit tai matalat saksiristikot.
- Ristikko, jonka puuosat on pinnoitettu esimerkiksi maalilla, lakalla tai homesuoja-aineella, sillä liitosten työstö ei vahingoita pinnoitusta.
- Visuaaliset, palonkestävät ja kosteisiin tiloihin soveltuvat ristikot.
- Ristikot, joiden paarteessa on mutka, voidaan eräissä tapauksissa tehdä.
- 300-500 mm korkea järeä ristikkorakenteinen primääri- tai sekundääripalkki.
- Ristikot, joiden paarteet ovat kaarevia tai räystää koristekuvioituja, ovat myös mahdollisia.

Sormiliimaliitos soveltuu myös järeämmästä puutavarasta koottuihin ristikoihin, joita voitaisiin käyttää suuremmille kuormille tai pidemmille jänneväleille. Monet teollisuushallit, maatalouden varastot ja kangaspinnoitetut hallit tehdään nykyään teräsrakenteisina, koska kilpailukykyistä puurakennusjärjestelmää ei ole ollut.

”Sormiliimaliitoksista on tehty satoja laboratoriokokeita, joiden tulokset ovat olleet vakuuttavia. Edessä onkin seuraavaksi tuotantolinjojen ja tuotteiden kehittäminen, hyväksyttäminen ja markkinointi.” (Poutanen 2009.)

3 Teoreettinen tausta

3.1 Puu materiaalina

Puu on luonnon materiaali, jonka tuotanto on energiatehokasta. Puutuotannon ympäristövaikutukset ovatkin pienemmät kuin monilla muilla rakennusmateriaaleilla. Puun ominaisuudet ovat hyvin erilaisia eri suunnissa. Syiden suunnassa puu on lujaa, kun taas syitä vastaan kohtisuorassa lujuusarvot ovat huomattavasti pienempiä. Puun ominaislujuusarvoja on esitetty taulukossa (1) materiaaliominaisuuksien kohdalla. Puun jäykkyys ja lujuusominaisuudet vaihtelevat paljon. Tätä vaihtelua on pienennettävä, jotta puusta saadaan luotettava rakennusmateriaali. Tällöin vaihtoehtoina on sahatavaran silmämääräinen tai koneellinen lujuuslajittelu tai vaihtoehtoisesti liimaamalla koottujen puutuotteiden, kuten liima- tai kertopuun, käyttö. Silmämääräinen lujuuslajittelu perustuu oksien koon ja sijainnin määrittämiseen. Koneellisessa lujuuslajittelussa puuosaa taivutetaan ja siten taipumasta määritetään lujuusominaisuudet. Sekä kerto- että liimapuutuotteiden ominaisuuksien vaihtelut ovat huomattavasti pienempiä, ja niille voidaan antaa paremmat lujuusarvot. Liima- ja kertopuusta voidaan myös tehdä poikkileikkauksia, joita sahatavarasta ei ole saatavissa. Suomessa on käytössä neljää eri lujuusluokan sahatavaraa: C18, C24, C30 ja C40. Puuosat sopivat erityisesti vedetyiksi, taivutetuiksi ja puristetuiksi rakenneosiksi, sillä puulla on hyvä lujuus - paino suhde, kuten teräkselläkin. Tämä yhdistettynä edullisuuteen tekee puusta kilpailukykyisen materiaalin monenlaiseen rakentamiseen.

Puun ominaisuudet ovat anisotrooppisia, eli ne vaihtelevat ympäristöolosuhteiden mukaan. Kuormitusaika vaikuttaa myös osaltaan puun muodonmuutoksiin ja lujuusarvoihin merkittävästi. Näitä ominaisuuksien vaihteluita voi olla erilaisia kappaleen sisällä. Puun kosteus riippuu ympäröivän ilman kosteudesta eli se on hygroskooppista. Puun kyllästymispiste on saavutettu, kun siihen sitoutunut vettä noin 30 % kuivapainosta, minkä jälkeen vesi sitoutuu solukkojen välisiin onteloihin kapillaarisesti. Kyllästyspisteeseen asti vesipitoisuuden kasvaessa puun ominaisuudet muuttuvat, mutta kyllästyspisteen jälkeen näin ei enää tapahdu. Kuivuessaan alle kyllästymispisteen puu kutistuu. Eniten kutistumista tapahtuu syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, jopa 7 %. Kutistuminen on erilaista vuosirenkaiden säteen suunnassa, kuin tangentin suunnassa,

minkä vuoksi liian nopeasti kuivannut puu voi halkeilla. Halkeamat heikentävät puuta. Siksi oikea kuivatustapa, jolla halkeilua voidaan estää, on tärkeää. Kosteus vaikuttaa myös puun mekaanisiin ominaisuuksiin. Kosteuden kasvaessa lujuus- ja kimmoarvot pienenevät. Kuormitetun puun muodonmuutokset kasvavat ajan kuluessa, eli tapahtuu virumista. Tähän vaikuttavat samalla suuresti myös kosteusolosuhteet. Kasvavat muodonmuutokset voivat pienentää rakenteen lujuutta, minkä vuoksi onkin tärkeää huomioida kuormien aikaluokat ja kosteusolosuhteet. Luonnon materiaalina puussa tapahtuu myös biologista tuhoutumista, jossa korkea kosteus on keskeisessä osassa. Kosteuden torjuminen suunnittelun avulla onkin tärkeää puurakenteissa. Vaihtoehtoina on myös käyttää käyttöympäristöön soveltuva puulajia tai puun suojakäsittelyä.

Puun lämpöominaisuudet ovat hyvät. Lämmönjohtavuutensa vuoksi ei puurakenteisiin muodostu kylmäsiltoja. Vaikka puu on palava ja syttyvä materiaali, palotilanteessa sen käyttäytyminen voidaan hyvin ennustaa. Puu hiiltyy pinnalta, mutta palamaton poikkileikkauksen ydinosa säilyttää lujuusominaisuutensa lähes muuttumattomana. Etenkin suuremmat poikkileikkaukset ovat hyvin hallittavissa palotilanteissa, kun taas esimerkiksi ristikoiden poikkileikkaukseltaan pienemmät sauvat on palotilanteissa suojattava. (Kurkela, Lahtinen, Muilu & Mäki-Ketälä 1996, A4/1-A4/19 ; Poutanen.)

3.2 Ristikkosuunnittelun periaatteita

3.2.1 Yleistä

Ristikkorakenteita on hyvin monia erilaisia, sillä ristikon muoto, materiaalit ja liitostekniikka yhdessä määräävät millaisia rakenteita käytetään. Ristikko voi olla tavallinen harja-, suora- tai pulpettiristikko, mutta myös paraabelin ja kaaren muotoiset ristikkorakenteet ovat mahdollisia. Ristikoissa sauvojen määrä voi vaihdella vain kolmesta sauvasta useaan kymmeneen. Liitostekniikoitakin on puurakenteisissa ristikoissa käytössä useampia erilaisia. Naulalevyliitokset ovat yleisiä tavallisissa omakotitalojen kattoristikoissa, kun taas esimerkiksi tappivaarnaliitoksia voidaan käyttää massiivisemmissä liimapuisissa ristikoissa.

Ristikon suunnittelussa on kohteesta riippumatta otettava huomioon seuraavia yleisiä periaatteita. Tavoitteena ristikoiden suunnittelussa on yleensä ulkoisesti staattisesti

määrätty ristikko. Muotoon on myös kiinnitettävä huomiota. Sauvojen sijoittelun optimoiminen on kuitenkin ristikkosuunnittelijan haastavimpia tehtäviä ja ristikkosuunnittelijalla onkin yleensä käytössä tarkoitukseen soveltuvia tietokoneohjelmia sekä kokemusta ja näkemystä siitä, millainen rakenne on toimiva. Rakenteellisesti ja arkkitehtonisesti selkeät ja symmetriset muodot ovat suositeltavia. Puristussauvat ovat vaarassa nurjahtaa, joten ne olisi saatava mahdollisimman lyhyiksi. Nurjahdustuettavia sauvoja ei pitäisi jättää rakenteeseen ollenkaan, jos se vain on mahdollista. Ristikön koko asettaa omia rajoitteitaan suunnitteluun. Suurikokoiset ristiköt on voitava jakaa osiin, sillä kuljetettavuus määrää pitkälti rakenteen maksimikoon. Osien ollessa hyvin suuria, niiden asennettavuus ja varastoitavuus kärsii. Riittävä harjakorkeus auttaa taipuman rajoittamisessa, mutta ristikoita on mahdollista myös esikorrota taipumien vähentämiseksi. (Puiset ristiköt 2006 TKK.)

3.2.2 Laskentamallit

Ristiköiden mitoituksessa voidaan käyttää kahta erilaista laskentamallia, tasoristikkoa tai kehärakennetta. Työn ristikkorakenteiden hallin kehien suuri koko ja monimutkaisuuden vuoksi on käytetty näiden mallintamiseen kehärakennemallia.

3.2.3 Ristikkorakenne

Ristikkorakenne on laskentamalli, jossa rakenteen sauvoihin kohdistuu vain joko vetoa tai puristusta. Ristikön kaikki sauvat liittyvät solmupisteissä toisiinsa kitkattomilla nivelillä ja ristikko muodostuu kolmioristikoista, joihin kaksi nivelsauvaa lisäämällä voidaan muodostaa uusia kolmioita. Kaikkien solmupisteiden ollessa samassa tasossa kyseessä on tasoristikko, muussa tapauksessa avaruusristikko. Naulatun ristikön mitoituksessa on käytetty tätä klassisen ristikkoteorian mukaista nivelristikkoa menestyksekkäästi. Ristikkorakenne mallinnetaan todellisen rakenteen sauvojen keskiöviivoina, jotka liittyvät toisiinsa päistään nivelellisesti. Ristikkorakenteen laskentamallissa tehtyjen oletusten mukaisesti kuormitukset voivat koostua vain solmukohtiin vaikuttavista pistekuormista. Todellisuudessa paarteet ovat jatkuvia ja nivelissä esiintyy epäkeskeisyyksiä. Käytäntö ja koetulokset ovat osoittaneet ristikkoteorialla mitoitettun ristikön kuitenkin toimivan hyvin. Tasoristikön sauvavoimat voidaan laskea esimerkiksi Cremonan tason tai Ritterin menetelmän avulla käsin, mutta erityisesti tietokoneohjelmat soveltuvat tähän tehtävään hyvin. (Lähtenmäki;

Kevarinmäki & Oksanen 2007, 86.)

Tasoristikko on jossain määrin idealisoitu ristikkomalli, jonka laskeminen on mahdollista myös käsin. Laskenta antaa kuitenkin hyvin käyttökelpoisia tuloksia, joiden avulla sauvojen poikkileikkauksien koot on mahdollista määrittää riittävällä tarkkuudella.

3.2.4 Kehärakenne

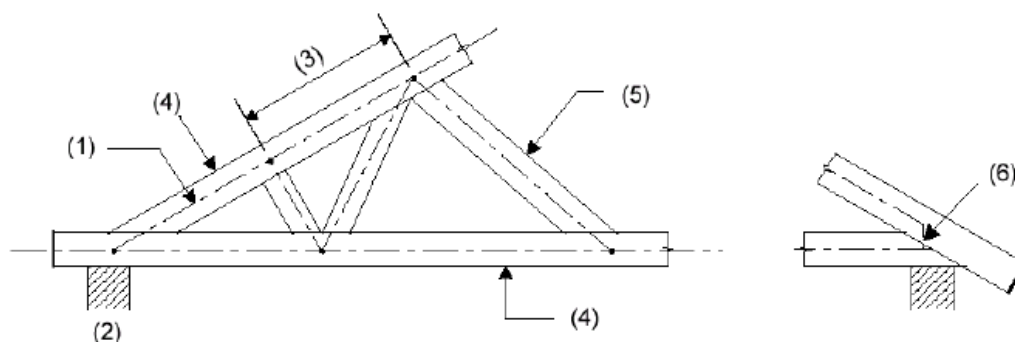
Kehärakenne on laskentamalli, jossa rakenneosat voivat ottaa vastaan kaikkia tavanomaisia rasituksia, joita ovat normaalivoima, leikkausvoima, taivutus- ja vääntömomentti. Kehämallia käytetään, kun oletetaan, että taivutuksella on oleellinen merkitys ainakin joissain rakenteiden osissa. Malliin siis kuuluu aina taivutuksen ja leikkausvoiman rasittamia sauvoja, mutta se voi myös sisältää sauvoja, jotka ottavat vastaan ainoastaan normaalivoimaa. Yleensä kehärakenteen palkkien oletetaan liittyvän toisiinsa jäykästi, eli niiden päät eivät kierry toisiinsa nähden minkään akselin ympäri, vaan ne kaikki kiertyvät yhtälailla. Rakennemalli voi sisältää niveliä tai luisteja, joita käytetään kuvaamaan palkkien päiden kiinnityksiä, jotka eivät ota vastaan taivutusta tai leikkausta tietyssä suunnassa. Laskentamallissa voidaan käyttää myös tasoristikkomallin kaltaisia puhtaasti puristus- ja vetosauvoja. Yhtälailla ristikkorakenteen kanssa, voidaan kehärakenteita käsitellä tasokehinä tai avaruuskehinä. Kehärakenteiden kuormitukset koostuvat solmupisteisiin kohdistuvista pistekuormista, pistemomenteista ja palkkeihin kohdistuvista viivakuormituksista. (Lähteenmäki; Kevarinmäki & Oksanen 2007, 86.)

Kehärakenne kuvaa siis tarkemmin todellisen rakenteen toimintaa, mutta toisaalta sen laskeminen on huomattavasti hankalampaa. Kehärakenteita lasketaankin usein käyttäen elementtimenetelmää (FEM), joka soveltuu mainiosti tietokonelaskentaan.

Vaikka ristikkorakenteita hyvin usein, yksinkertaistuksen vuoksi, kuvataan kaksiulotteisina rakenteina, ne ovat todellisuudessa osana kolmiulotteista rakennekokonaisuutta. Kaksiulotteinen ristikkorakenne mitoitetaan vain ottamaan vastaan tasossa vaikuttavia kuormia. Todellisuudessa ristikot ovat yhteydessä toisiinsa esimerkiksi nurjahdustukien ja yläpaarteeseen kiinnitettyjen orsien kautta. Nämä siirtävät vaakakuormia ristikoille aiheuttaen siirtymiä ja jännityksiä, joita laskelmissa ei ole otettu huomioon lainkaan. (Kurkela ym. 1996, B12/3)

3.2.5 Kehärakenteen mallintamisperusteita

Rakenteiden mallintamisessa tulee sauvojen systeemiviivojen olla sauvan poikkileikkauksen alueella siten, että ne yhtyvät kehärakenteen pääsauvojen, kuten ylä- ja alapaarteiden, keskilinjoihin. Ristikon uumasauvojen systeemiviivojen kulkiessa muualla kuin sauvan keskilinjan kohdalla, tämä tulisi huomioida myös laskennassa. Jos sauvojen linjat eivät kohtaa toisiaan, voidaan myös käyttää kuvitteellisia palkki- tai jouselementtejä, joiden tulee kuvata todellisen liitoksen rakennetta. Kuvassa (3) on esimerkki mallin osista ja mallista. (Kevarinmäki & Oksanen 2007, 62.)



Selite:

- (1) Systeemiviiva
- (2) Tuki
- (3) Kenttäväli
- (4) Paarre
- (5) Uumasauva (diagonaali tai vertikaali)
- (6) Fiktiivinen palkki

Kuva 3. Ristikkomallin osat (SFS-EN 1995-1-1)

3.3 Mitoitus

3.3.1 Yleistä mitoituksesta

Opinnäytetyössä kehät on mitoitettu eurokoodien mukaan. Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja, jotka syrjäyttävät nyt vielä rinnalla käytössä olevat kansalliset määräykset vuonna 2011. Seuraavassa esitellään lyhyesti SFS-EN1990:n mukaisia suunnitteluperusteita, SFS-EN1991:n mukaisia kuormituksen laskennan perusteita sekä SFS-EN1995:n mukaisia materiaaliominaisuuksia, joita kaikkia on mitoituksessa käytetty. Työssä on käytetty myös standardia SFS-EN1993 terässauvojen mitoittamisen apuna, mutta itse mitoitus on tehty teräsrakenteiden mitoitusohjelmalla. Eurokoodien mukainen mitoitus on rajatilamitoitusta. Rajatilalla tarkoitetaan luotettavuutta sen tilan suhteen, jonka jälkeen

rakenne ei enää toimi sille asetettujen toimivuuskriteerien mukaan. Rajatiloja on käytössä kaksi, käyttörajatila ja murtorajatila.

3.3.2 Murtorajatilamitoitus

Murtorajatilamitoitus käsittää rakenteiden kestävyys, staattisen tasapainon ja onnettomuustilanteet kuten tulipalon, tai törmäyksen. Murtorajatilojen kuormitukset yhdistellään seuraavien kaavojen mukaan. (Kearinmäki & Oksannen 2007, 24.)

Rakenteen kestävyys:

$$1,15K_{FI}G_{k,j} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i}Q_{0,i} \quad (1)$$

$$1,35K_{FI}G_{k,j} \quad (2)$$

missä K_{FI} on seuraamusluokasta riippuva kuormakerroin

$G_{k,j}$ on pysyvän kuorman ominaisarvo

Q on muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\psi_{0,i}$ on muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

Rakenteiden staattinen tasapaino:

$$1,1K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} + 1,5K_{FI}Q_{k1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i}Q_{0,i} \quad (3)$$

missä $G_{kj,sup}$ on epäedullinen osuus pysyvän kuorman ominaisarvosta

$G_{kj,inf}$ on edullinen osuus pysyvän kuorman ominaisarvosta

Onnettomuustilanteet:

$$G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1}Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i}Q_{k,i} \quad (4)$$

$$G_{k,j} + A_d + \sum_{i>1} \psi_{2,i}Q_{k,i} \quad (5)$$

missä A_d on onnettomuuskuorman mitoitusarvo

$\psi_{2,i}$ ja $\psi_{1,1}$ on yhdistelykertoimia

3.3.3 Käyttörajatilamitoitus

Käyttörajatila käsittää rakennuksen käyttötarkoitusta haittaavat muodonmuutokset, värähtelyt ja rakenteita heikentävät vauriot, kuten halkeamat. ”Kuormien vaikutuksista sekä kosteudesta rakenteeseen syntyvän muodonmuutostilan tulee pysyä riittävän pienenä, kun otetaan huomioon, että se voi aiheuttaa vahinkoa pintamateriaaleille, katoille, lattioille, keveille väliseinille tai pinnoitteille tai tuottaa haittaa toiminnan tai ulkonäkövaatimusten kannalta.” (Kevarinmäki & Oksanen 2007, 27.) Käyttörajatilan kuormat yhdistellään seuraavan kaavan mukaan.

$$G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{0,i} \quad (6)$$

missä G on pysyvän kuorman ominaisarvo

Q on muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\psi_{0,i}$ on muuttuvan kuorman yhdistelykerroin

3.3.4 Materiaaliominaisuudet

Sahatavaran lujuuden ja jäykkyyden ominaisarvot on esitetty taulukossa (1). Arvot vastaavat 5 minuutin kuormitusaikaa ja RH 65 %:n kosteusolosuhdetta. Ominaisarvojen muuttaminen laskenta-arvoiksi vaatii niiden muokkaamista materiaalin jäykkyys ja kestävyysominaisuuksien osavarmuusluvulla γ_M ja kosteusolosuhteet ja kuorman keston huomioivalla muunnoskertoimella k_{mod} . Mitoitusarvot lasketaan seuraavan kaavan mukaan:

$$X_d = k_{\text{mod}} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (7)$$

missä k_{mod} on kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroin

γ_M on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku

X_d on lujuusominaisuuden mitoitusarvo

X_k on lujuusominaisuuden ominaisarvo

Taipumaa laskettaessa on myös otettava huomioon viruman vaikutus joka huomioidaan virumaluvulla k_{def} .

Taulukko 1. Havupuun ominaislujuudet, jäykkyysominaisuudet ja tiheydet eri lujuusluokissa (Puurakenteiden suunnittelu. Lyhennetty suunnitteluohje 2010)

Lujuusluokka		Sahatavara			Liimapuu	
		C18 (T1)	C24 (T2)	C30 (T3)	GL28c	GL32c
Ominaislujuudet (N/mm ²)						
Taivutus	$f_{m,k}$	18	24	30	28	32
Veto	$f_{t,0,k}$	11	14	18	16,5	19,5
	$f_{t,90,k}$	0,5	0,5	0,6	0,4	0,45
Puristus	$f_{c,0,k}$	18	21	23	24	26,5
	$f_{c,90,k}$	2,2	2,5	2,7	2,7	3,0
Leikkaus	$f_{v,k}$	2,0	2,5	3,0	2,7	3,2
Jäykkyysominaisuudet (N/mm ²)						
Kimmomoduuli	$E_{0,mean}$	9000	11000	12000	12600	13700
	$E_{90,mean}$	300	370	400	390	420
Liukumoduuli	G_{mean}	560	690	750	720	780
Tiheydet (kg/m ³)						
Ominaistiheys	ρ_k	320	350	380	380	410
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	380	420	460	430	470

3.3.5 Kuormitukset

Mitoituksessa käytettävät kuormitukset ovat SFS-EN 1991 mukaisia. Kuormituksia rakenteille aiheuttavat:

- rakenteiden oma paino
- hyötykuormat
- lumikuormat
- tuulikuormat
- lämpötilakuormat
- rakennusaikaiset kuormat
- onnettomuuskuormat

Jokaisen hallikehän kuormitukset on laskettu käyttäen apuna MathCAD – ohjelmaa.

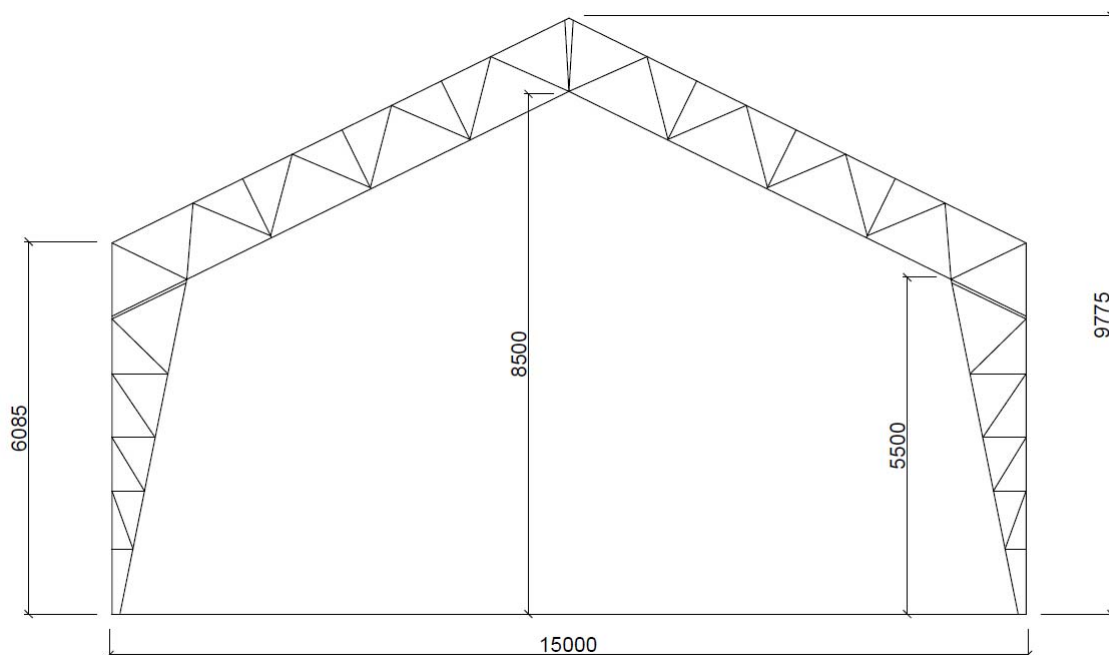
Kuormituksen laskenta on esitetty liitteissä 2, 3 ja 4, joista löytyy jokaisen kehän tuuli- ja lumikuormat. Samaan yhteyteen on kuormituksista piirretty myös havainnolliset kuvat, joista näkee helposti mm. tuulikuorman arvot rakennuksen eri kohdissa eri kuormitustilanteissa.

4 Vertailuasetelma

4.1 Vertailun hallikehät

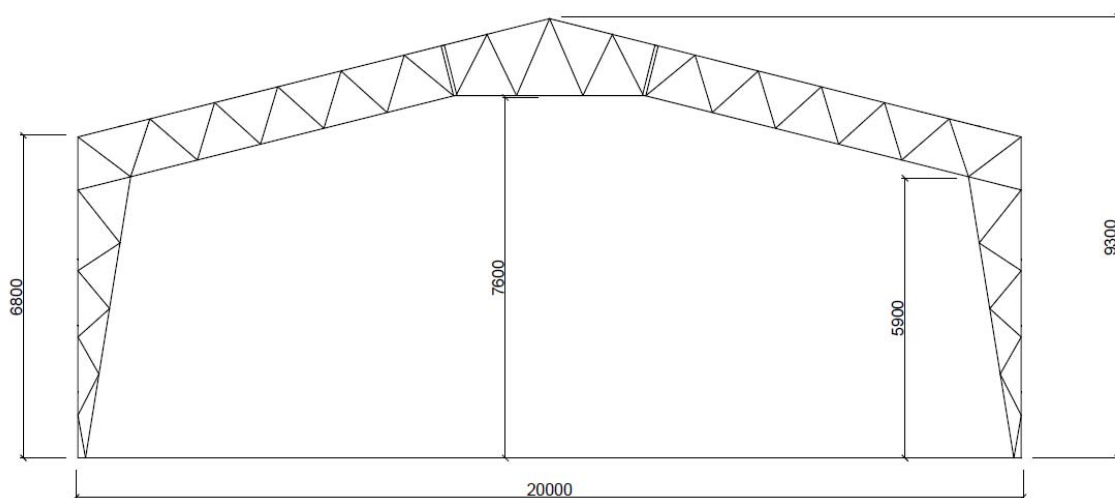
Vertailuun on otettu kolme ristikkorakenteista hallikehää eri jänneväleillä. Tarkoituksena oli selvittää mikä on sormiliimaliitostekniikalla toteutettujen puurakenteisten hallikehien hintaero vastaaviin teräsrakenteisiin kehiin. Vertailussa tutkittiin myös miten kehävälin ja jännevälin muuttaminen vaikuttaa puukehaisen hallin kokonaiskustannuksiin. Onko edullista pienentää puurakenteisen hallin kehäväliä, jotta kehän kuormat ja siten sauvojen koot pienenevät, mutta toisaalta kehiä tulee halliin enemmän, vai käytetäänkö suurempia kuormia ja järeämpiä poikkileikkauksia. Kaikki vertailun hallit ovat PVC-pinnoitettuja halleja, mutta vertailu tulokset vastaavat hyvin myös muiden hallien kustannuksia, joiden runkorakenne on vastaavan kaltainen. Vertailun halleissa on käytetty tunnetun teräsristikkorakenteisten hallien toimittajan alustavaa hallien mittataulukkoa, jonka avulla vertailun suurempien hallien päämitat on valittu. Vertailun halleista saatiin vain yksi valmiiksi mitoitettuna, joten muut on suunniteltu ja mitoitettu alusta lähtien. Toisaalta tällä tavalla hallien geometriat vastaavat toisiaan hyvin tarkasti ja kuormitukset ovat täysin identtiset. Työssä myöhemmin tullaan viittaamaan halleihin numeroillaan 1-3.

Halli 1. on Janus Oy:n teräsristikkorakenteinen tavanomainen kaksinivelkähäinen PVC - pinnoitteinen halli. Hallin rakennekuvat, jotka ovat myös työn liitteenä 5, ovat Janus Oy:ltä. Halli on 40 m pitkä, kun jännevälin on 15 m. Muut mitat selviävät oheisesta kuvassa (4). Halli on suunniteltu pulttiliitoksien työmaalla koottavaksi neljästä osasta. Kehä voitaisiin tehdä kuljetuksen kannalta myös vain kahdesta puolikkaasta.



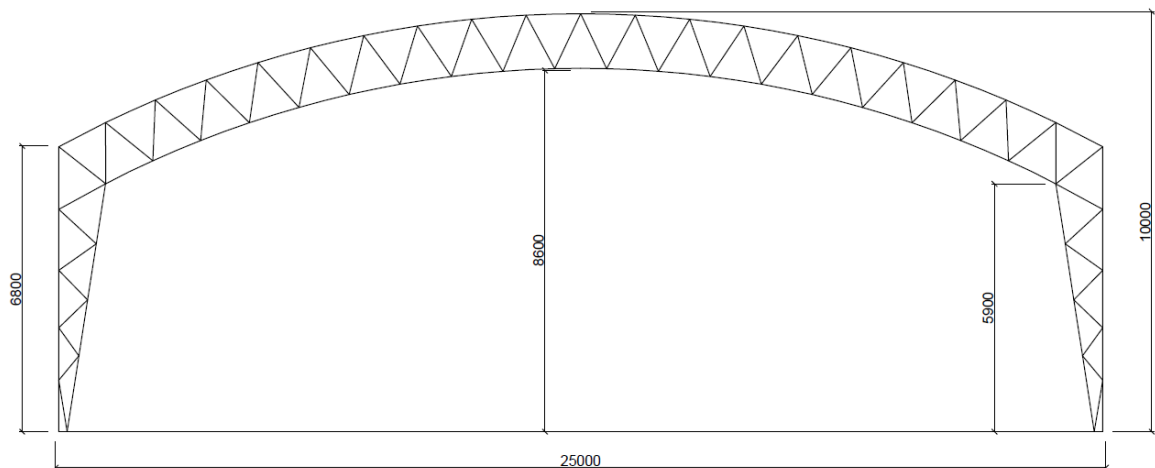
Kuva 4. Hallin 1. rakennemalli ja päämitat.

Halli 2. on teräsristikkorakenteinen halli, joka on esimerkkimittojen mukaan vertailuun suunniteltu. Halli on 50 m pitkä ja jänneväli on 20 m. Hallin kaksinivelkehän päämitat selviävät kuvasta (5). Halli on suunniteltu viidestä pienemmästä osasta pulttiliitoksin koottavaksi työmaalla. Kaikkia kehän eri osien liitoskohtia ei ole tarkasti mallinnettu, sillä liitokset aiheuttavat malliin epäjatkuvuus kohtia, joita tulisi tutkia liitoksia mitoitettaessa tarkemmin.



Kuva 5. Hallin 2. rakennemalli ja päämitat.

Halli 3. on myös esimerkkimittojen mukaan vertailuun suunniteltu halli. Pidemmällä jänneväleillä kaaren muoto on voimien jakautumisen kannalta edullisempi muoto rakenteelle. Kaarevan osan sauvat on mallinnettu jakamalla ne kahdeksi pienemmäksi sauvaksi ja näin lähestytty rakenteen todellista geometriaa. Kaarevasta muodosta huolimatta on sauvat kuitenkin yksinkertaistuksen vuoksi mitoitettu suorina sauvoina, jolloin mitoituksen voidaan olettaa olevan likimäärin oikein. Kehän jänneväli on 25 m ja hallin pituus 50 m. Kehän kaariosa voidaan toteuttaa yksi-, tai kaksiosaisena. Pidemmällä jänneväleillä pilariosan voimat kasvavat nopeasti suuriksi. Jos halutaan käyttää ainoastaan sahatavaraa, voitaisiin pilariosa tehdä kahdesta vierekkäisestä ristikon osasta tai vaihtoehtoisesti käyttää pilariosassa yksittäisiä suurempia poikkileikkauksia kuten tukkeja. Kuvassa (6) on kaaren muotoisen kehän rakennemalli.



Kuva 6. Hallin 3. rakennemalli ja päämitat

Halleissa 2. ja 3. on hyvä huomata pilariosan alimmat sauvat, joiden tarkoitus on muodostaa kehärakenteesta alhaalta asti jatkuva ristikko. Todellisuudessa näitä sauvoja ei rakenteeseen tulisi, vaan liitos perustuksiin olisi hieman erilainen, jolloin voimat pilariosan sauvoissa muuttuisivat. Mallissa niillä on kuitenkin selkeä tarkoitus, pienentää pilariosan momentit todellisuutta paremmin vastaaviksi. Nämä alimmat uuman sauvat on kuitenkin huomioitu myös kustannuksia laskettaessa.

4.2 Kuormitusyhdistelmät ja kuormitukset

Mitoituksessa on pyritty hyvin tarkasti laskemaan rakenteen kuormitukset. Mitoituksessa on käytetty taulukossa (2) olevia kuormituksia.

Taulukko 2. Mitoituksessa käytettyjä kuormituksia

Kuormitustapaukset:
KT01 Pysyvä kuormitus
KT02 Lumi 1 (maks.)
KT03 Lumi 2 (oik. maks.)
KT04 Lumi 3 (vas. maks.)
KT05 Tuuli vasemmalta 1.
KT06 Tuuli vasemmalta 2.
KT07 Tuuli päädystä (kohta H)
KT08 Tuuli oikealta 1.
KT09 Tuuli oikealta 2.

Kuormitukset on yhdistelty kappaleissa murtorajatila ja käyttörajatila esiteltyjen kaavojen mukaisesti. Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa kuormitusyhdistelmiä tulee kuitenkin huomattavan suuri määrä, minkä vuoksi tässä työssä pyrittiin valitsemaan laskentaan vain määräävimmit yhdistelmät. Taulukossa (3) on esitetty millä kuormitusyhdistelmillä murtorajatilan sauvoissa vaikuttavat voimat on laskettu. Myös käyttörajatilan kuormitusyhdistelmiä on käytetty laskennassa rakenteen taipumien seuraamisessa.

Taulukko 3. Murtorajatilan kuormitusyhdistelmät

Murtorajatila	
Kuormitusyhdistelmän nro.	Yhdistelmä:
KY01	1,15KT01+1,5KT02
KY02	1,15KT01+1,5KT03
KY03	1,15KT01+1,5KT04
KY04	0,9KT01+1,5KT07
KY05	1,15KT01+1,5KT05+1,05KT02
KY06	1,15KT01+1,5KT05+1,05KT03
KY07	1,15KT01+1,5KT05+1,05KT04
KY08	1,15KT01+1,5KT06+1,05KT02
KY09	1,15KT01+1,5KT06+1,05KT03
KY10	1,15KT01+1,5KT06+1,05KT04
KY11	1,15KT01+1,5KT02+1,05KT05
KY12	1,15KT01+1,5KT03+1,05KT05
KY13	1,15KT01+1,5KT04+1,05KT05
KY14	1,15KT01+1,5KT02+1,05KT06
KY15	1,15KT01+1,5KT03+1,05KT06
KY16	1,15KT01+1,5KT04+1,05KT06

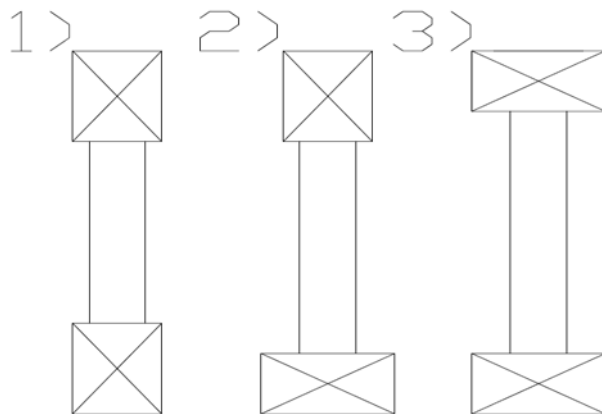
4.3 Kehien mitoitus tässä työssä

Hallien kehiiä mitoittaessa on tässä työssä pyritty säilyttämään hallikehän mallin päämitat samoina, jotta kehät olisivat vertailukelpoisia keskenään. Hallin räystääskorkeus, kattokaltevuus, harjan korkeus ja vapaa korkeus hallin sisällä on säilytetty samoina, sekä teräksisissä, että puurakenteisissa halleissa. Puurakenteista kehää mitoittaessa on kuitenkin jouduttu tekemään pieniä muutoksia alkuperäiseen geometriaan, muun muassa kasvaneiden poikkileikkausten kokojen myötä. Myös itse kehän sauvojen sijoittelu on pyritty säilyttämään mahdollisimman samankaltaisena, jotta vertailuasema kehien välillä olisi mahdollisimman tasavertainen ja siten tulokset hyvin vertailukelpoisia. Suunnittelun mahdolliset huonot valinnat geometriassa vaikuttavat molemmissa kehämalleissa yhtälailla. Tässä työssä on keskitytty mitoittamaan ainoastaan kehän sauvojen koot, eikä liitoksiin ole kiinnitetty suurempaa huomiota, perustuen sormiliimaliitoksilla tehtyihin kokeisiin, joissa puun lujuus on osoittautunut pienemmäksi kuin itse liitoksen. Ristikön eri osakokonaisuuksien liitokset toisiinsa ja liitokset perustuksiin on myös jätetty ratkaisematta.

Kehien mitoitus eteni tässä työssä pääpiirteittäin seuraavalla tavalla. Ensiksi on kerätty kyseisen hallin kuormitustiedot: tuulikuormat, lumikuormat, hyötykuormat sekä oma paino. Jokaisen hallin kuormitustiedot ja kuormitustapaukset esitellään tarkemmin kyseisen hallikehän kuvauksessa (liitteet 2-4). Tämän jälkeen on rakenteesta tehty malli WinStatik- tasokehäohjelmaan, jolla sauvoissa vaikuttavat voimat ja rakenteen taipumat on laskettu. Sauvavoimien käsinelaskeminen kehärakenteessa, jossa on useita kymmeniä, jopa satoja, sauvoja ja solmupisteitä on hyvin hankalaa ja aikaa vievää. WinStatik on kätevä ja helppokäyttöinen ohjelma kaksikulotteisten ristikkorakenteiden laskemiseen. Mallista mitoittetaan sauvavoimien avulla alustavasti sauvojen poikkileikkausten koot, jonka jälkeen mallia tarkennetaan laskennan edetessä. Sauvojen koot, rakenteen omapaino sekä osittain kehän geometriakin muuttuvat, minkä vuoksi tehdään uusi tarkempi malli, jossa on huomioitu nämä seikat. Laskennan tarkkuuden ollessa riittävällä tasolla, kehäohjelmasta saatujen sauvojen normaali- sekä leikkausvoimien ja taivutusmomenttien avulla mitoittetaan lopullisen rakenteen sauvojen koot. Eri sauvojen poikkileikkauskokojen määrä on pyritty rakenteissa pitämään mahdollisimman vähäisenä,

jotta rakenteesta saataisiin selkeän ja toimiva. Sauvakokoja rakenteessa on käytetty enintään kuutta eri kokoa.

Sormiliimaliitostekniikan ansiosta voidaan ylä- ja alapaarteen sauvat sijoittaa kuvan (7) vaihtoehtojen mukaan. Vaihtoehto 2 osoittautui hyväksi vaihtoehdoksi, jota onkin pyritty kaikissa kehissä käyttämään. Hallin 3. sauvoissa on käytetty vaihtoehtoa 3, jotta sauvojen taivuttaminen kaaren muotoon olisi mahdollista. Alapaarteen sijoittaminen lappeelleen, tai neliöpoikkileikkauksen käyttö on järkevää ristikon korkeuden madaltamiseksi, koska alapaarteessa ei yleensä ole suuria taivuttavia voimia. Momenttijäykkien liitosten vuoksi on kaikissa sauvoissa kuitenkin pieniä taivuttavia voimia.



Kuva 7. Ylä- ja alapaarteen sauvojen sijoittelun vaihtoehdot

Nurjahdusta laskettaessa on tarkasteltu ainoastaan tason suunnassa vaikuttavia voimia. Todellisuudessa on puristetussa rakenteessa mahdollisuus tilanteeseen, jossa esimerkiksi alapaarteen puristettu sauva nurjahtaa pois tasostaan. Nurjahduksessa myös uuman sauvoihin muodostuu tasoa vastaan olevassa suunnassa taivuttavia lisävoimia, jotka tulee huomioida. Todellisia kohteita mitoitettaessa tulee tämä ottaa huomioon laskennassa, tai sijoittaa kriittisiin kohtiin nurjahdustukia, jotka estävät tämän. Sormiliimaliitokset mahdollistavat kuitenkin sauvojen sijoittelun niin, että alapaarteen sauvat ovat lappeellaan kuvan (7) vaihtoehdon 2 mukaisesti, jolloin taivutusvastus on suurempi tilanteessa, jossa alapaarre pyrkii taipumaan tasostaan pois.

Taipumien tarkastelu on tehty myös WinStatik- ohjelmalla. Ristikkojen taipumat ovat hyvin usein melko pieniä, eivätkä ne siten tule rakenteen mitoittaviksi tekijöiksi. Myös tässä opinnäytetyössä tarkasteltujen kehien osalla taipumat olivat hyvin maltillisia. Halleilla 2 ja 3 kehien taipumien arvot olivat n. puolet sallitusta, kun kehää rasitti rakenteen oma paino sekä täysi lumikuorma. Samalla kuormituksella hallin 1 taipuma oli vain noin kolmasosa sallitusta korkeamman rakenteensa ansiosta.

4.3.1 Teräs

Teräsrakenteisen hallin kehät mitoitettiin myös edellä kuvatulla tavalla. Sauvojen mitoituksessa on käytetty apuna DOFTeräs 1.1 Teräsrakenteet mitoitusohjelmaa. Yksinkertaistuksen vuoksi on teräsprofiileina käytetty ainoastaan neliön muotoisia putkia, jotka kuuluvat poikkileikkausluokkaan yksi tai kaksi. Teräsrakenteessa uuman sauvat on mallinnettu nivellisesti kiinnittyneinä ylä- ja alapaarteisiin jolloin nurjahduspituus sauvoilla on solmuväli. Ylä- ja alapaarre sekä muiden jatkuvien sauvojen nurjahduspituutena on käytetty arvoa $0,8 * \text{solmuväli}$.

4.3.2 Puu

Puurakenteisen kehän sauvoina on käytetty ainoastaan C30- lujuusluokan sahatavaraa. Syynä sahatavaran käyttöön on pyrkimys edulliseen ratkaisuun. Käytettäessä liima- ja kertopuisia sauvoja puun kuutiohinta kasvaa, jolloin kehän hinta myös kasvaa. Puurakenteisen kehän kaikkien sauvojen nurjahduspituutena on käytetty arvoa $0,8 * \text{solmuväli}$. Tämä perustuu siihen, että sormiliimaliitoksilla tehdyt liitokset ovat täysin jäykkiä, ja näin ollen myös nurjahduspituutta voidaan pienentää. Sauvoissa on käytetty monenkokoisia poikkileikkauksia. Rakenteen teollinen valmistus mahdollistaa erikoisempienkin poikkileikkauskokojen käytön, eikä suunnittelijan tarvitse tyytyä ainoastaan suositeltaviin poikkileikkauskokoihin, joita on yleisesti saatavilla.

4.3.3 Mitoituspohja

Puurakenteisten sauvojen mitoituksessa on käytetty työtä varten tehtyä mitoituspohjaa. Mitoituspohja on tehty MathCAD ohjelmalla ja se on työn liitteenä 1 esimerkkilaskun muodossa. Seuraavassa esitellään lyhyesti mitoituspohjan laskennan kulku.

Mitoituspohja on tehty siten, että sillä on helppo ja nopea mitoittaa erikokoisia sauvoja eri kuormille. Aluksi arvioidaan mitoittettavan sauvan poikkileikkaus. Poikkileikkausarvot lasketaan kahden sauvan akselin suhteen, joten mitoittaessa on oltava akselien suuntien suhteen tarkkana. Mitoituspohjalla lasketaan seuraavat poikkileikkausarvot:

- pinta-ala
- jäyhyysmomentti
- taivutusvastus
- jäyhyyssäde
- hoikkuus

Seuraavaksi annetaan sauvaan rasittavat voimat. Laskentapohjaan on laskettu valmiiksi C30 sahatavaran materiaaliominaisuuksien laskenta-arvot kohdan 3.3.4 kaavan (7) mukaisesti. Laskentapohja mitoittaa sauvan seuraaville pääsuunnan jännityksille:

- veto syysuuntaan
- puristus syysuuntaan
- taivutus
- leikkaus

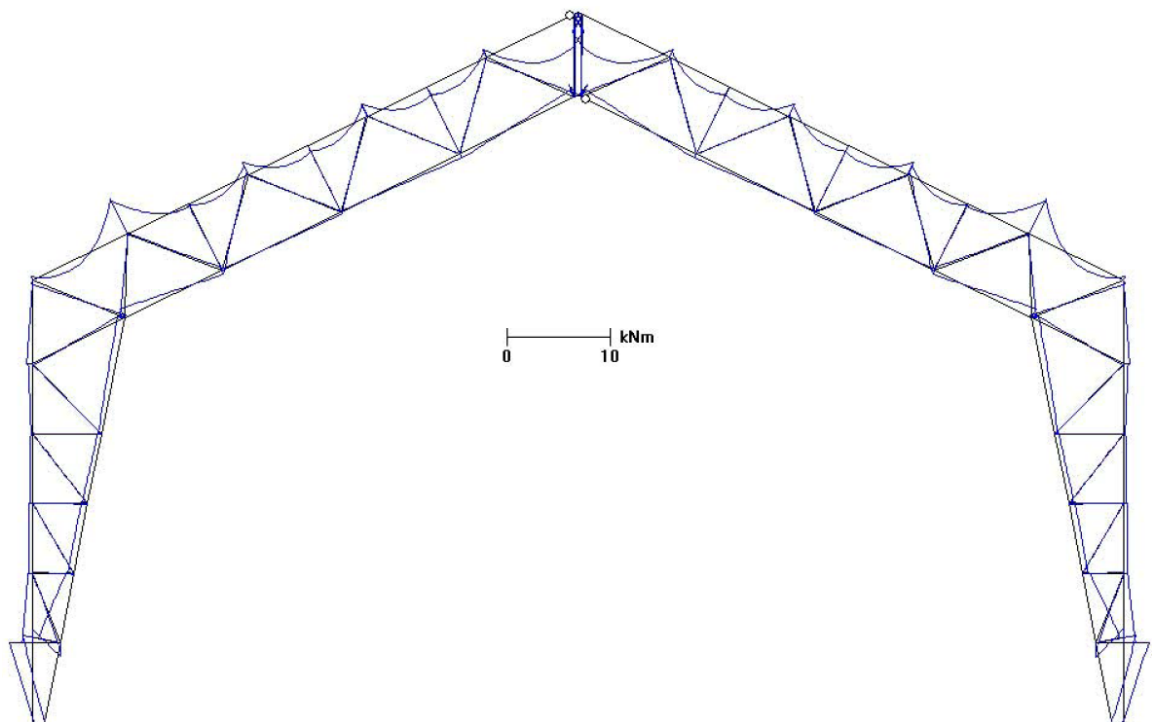
Puisten sauvojen liitokset ovat momenttijäykkiä, joten sauvoissa vaikuttaa aina normaalivoimien lisäksi taivuttavia voimia. Tämän vuoksi mitoitus yhdistetyille jännityksille määrää aina poikkileikkauksen koon. Laskentapohja mitoittaa sauvat seuraaville yhdistetyille jännityksille.

- yhdistetty taivutus ja veto
- yhdistetty taivutus ja aksiaalinen puristus
- nurjahduskestävyys
- taivutetun sauvan keipahduskestävyys

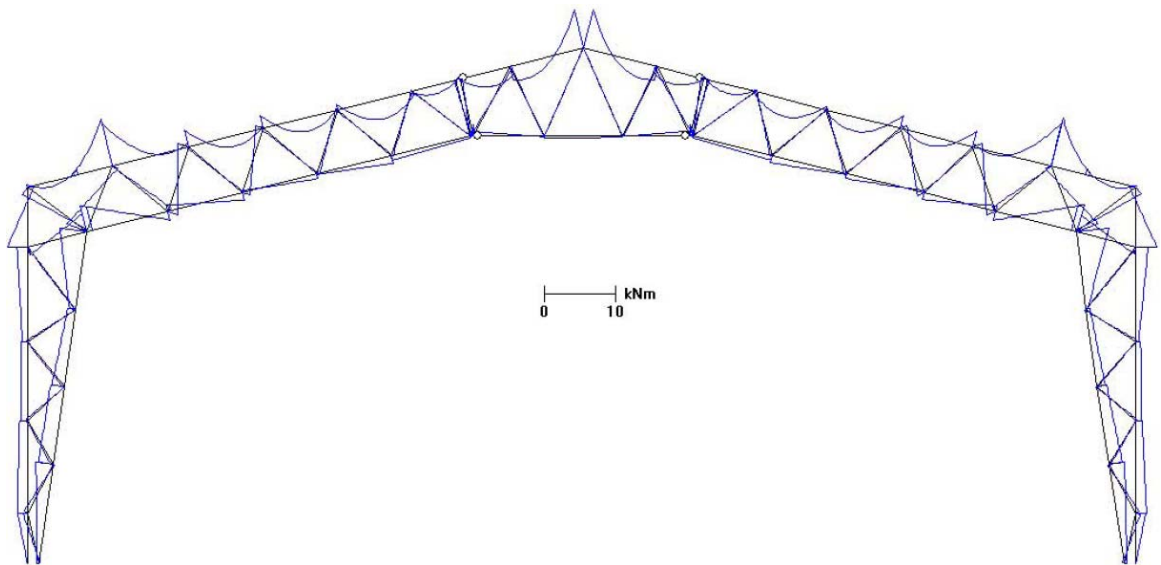
Rakenteen sauvoja ei ole nurjahdustuettu, joten nurjahdus tulee usein määrääväksi tekijäksi. Vedetyillä sauvoilla taas yhdistetty taivutus ja veto määräävät poikkileikkauksen koon. Kiepahduskestävyys tulee tällaisessa rakenteessa määrääväksi ainoastaan korkealla ja hoikalla yläpaarteella. Käytännössä yläpaarteen päällä olevien orsien jako määrää onko kiepahtaminen mahdollista. Sauvat ovat kuitenkin mitoitettu myös kiepahdukselle, vaikka se harvoin tulee määrääväksi tekijäksi.

4.3.4 Momenttikuviot

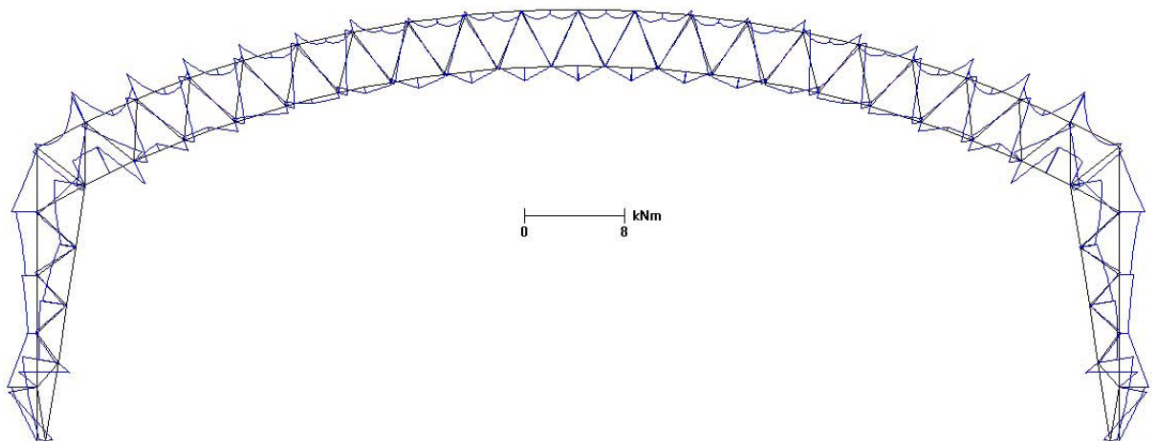
Momenttikuvioiden avulla voidaan tarkastella rakennemallien toimivuutta. Kuvien (8 – 10) puurakenteisten kehien momenttikuviot ovat otettu murtorajatilanteesta, jossa rakenteiden omapaino ja täysi lumikuorma rasittavat kehää. Kehärakenteen mallin toimivuuden vaikutukset hintavertailun tuloksiin tosin ovat vähäiset, koska kehiä vertailtaessa on käytetty käytännössä lähes samaa mallia mitoituksen pohjana.



Kuva 8. Hallin 1. kehän momenttikuvio



Kuva 9. Hallin 2. kehän momenttikuvio



Kuva 10. Hallin 3. kehän momenttikuvio

Hallien 2. ja 3. malleista voidaan nähdä mm. alapaarteissa ja osassa uuman sauvoista taivuttavia voimia, joita olisi mahdollista merkittävästi pienentää malleja parantamalla. Kehät on mitoitettu käyttäen näitä malleja, vaikka niissä olisikin vielä parantamisen varaa.

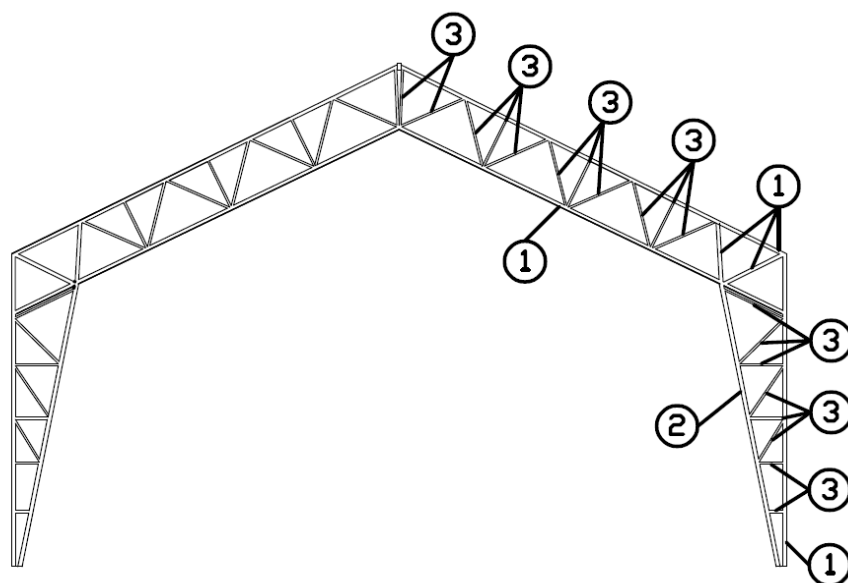
5 Vertailu

5.1 Vertailu halleittain

Seuraavassa kuvat (11 -16) ovat teräsrakenteisesta hallista ja samasta hallista mitoitetuna puurakenteisena. Kuvista selviää mitä profiilikokoja rakenteessa on käytetty ja mitä muita pieniä mahdollisia eroavaisuuksia, joita mitoituksessa on voinut tulla. Kuvissa on ilmoitettu myös sauvojen poikkileikkausten suunnat, $x - x$ ja $y - y$. Suunnalla $x - x$ tarkoitetaan tason suunnassa poikkileikkauksen taivutusvastukseltaan vahvempaa suuntaa ja $y - y$ suunnalla heikompaa. Puisten hallien uuman sauvat pyritty mitoittamaan hyvinkin tarkasti, jolloin rakenteesta näkee helpommin sauvojen kokoja vertailemalla sauvoissa vaikuttavien voimien suhteita. Todellisuudessa poikkileikkausten määrää voisi pienentää valitsemalla vetosauvojen koot vieressä olevien puristussauvojen kokojen mukaan, jolloin myös itse rakenne olisi selkeämmän näköinen. Tämän suhteen vertailun hallit eivät ole täysin samoin perustein mitoitetuja. Uuman vetosauvojen osalta kokonaisuuden hintaero ei kuitenkaan merkittävästi muuttuisi, vaan kyseessä olisi enintään muutaman prosentin osuus. Teräsrakenteisissa kehissä pienimpänä sauvana käytetty CFRHS 50x50-3 kestää erittäin hyvin suurempiakin kuormia joten, sitä voidaan käyttää suuremmassa osassa uuman sauvoja, kun puurakenteisilla on tarkemmin valittava sauvojen koot. Tästä johtuu myös se, että puurakenteisissa kehissä on käytetty useampia sauvoja kuin teräsrakenteisissa.

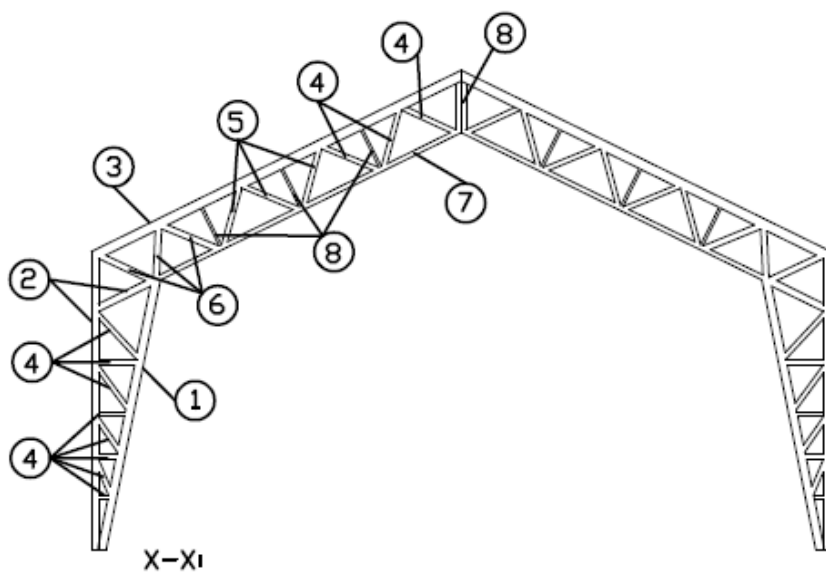
5.1.1 Halli 1

Hallin 1. rakenteet poikkileikkauksineen kuvissa (11) ja (12). Puurakenteiseen malliin on lisätty sauvat pilariosaan, jotta kehän muodostuisi kokonaisuudessaan ristikkomallin mukaisista kolmioista joihin kaksi sauvaa lisäämällä saadaan uusia kolmioita. Vaikka pilariosan voimat eivät juuri sauvojen vaikutuksesta muutu, on sauvojen lisääminen kuitenkin statiikan ja rakenteen mallin kannalta perusteltua. Kehän uuman sauvoissa on käytetty vertikaaleja joiden tarpeellisuutta tulisi tapauskohtaisesti pohtia.



- ① CFRHS 70x70-3 Kuumasinkitty
- ② CFRHS 80x80-3 Kuumasinkitty
- ③ CFRHS 60x40-3 Kuumasinkitty

Kuva 11. Hallin 1. sauvojen teräsprofiilit

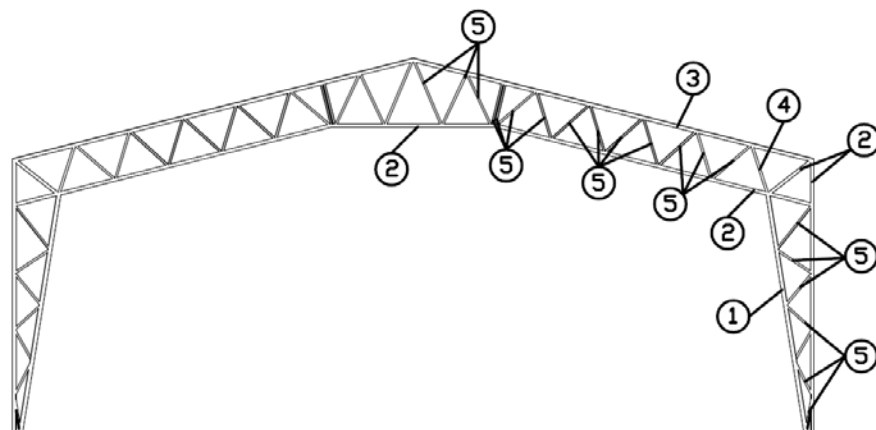


- | | |
|---------------|---------------|
| ① 150x175 C30 | |
| ② 100x150 C30 | Y-Y1 |
| ③ 100x200 C30 | ⑦ 200x100 C30 |
| ④ 50x100 C30 | ⑧ 100x50 C30 |
| ⑤ 100x100 C30 | |
| ⑥ 100x125 C30 | |

Kuva 12. Hallin 1.sauvojen poikkileikkaukset

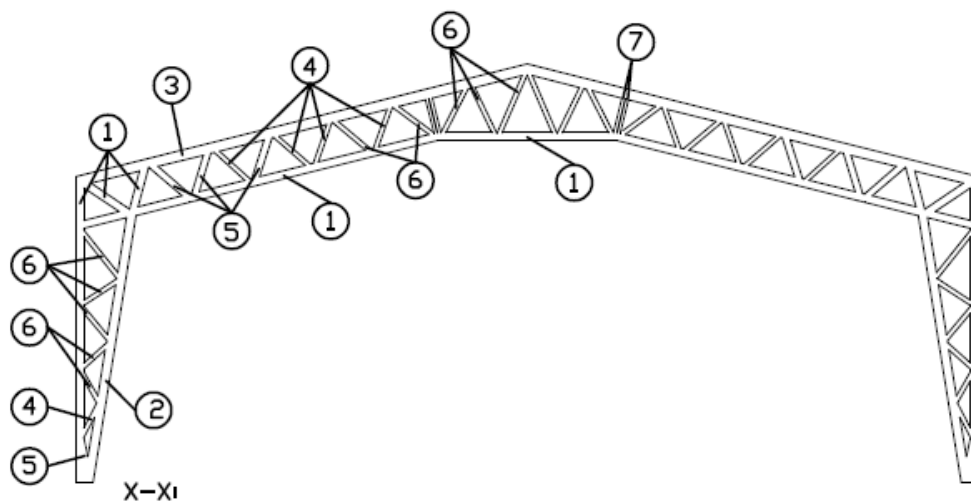
5.1.2 Halli 2

Hallin 2. rakennemallit ovat hyvin samanlaiset (kuvat 13 ja 14), eikä suuria muutoksia ole rakenteisiin puisen ja teräksisen kehän välille tehty.



- ① CFRHS 100x100-4
- ② CFRHS 80x80-3
- ③ CFRHS 90x90-3
- ④ CFRHS 60x60-3
- ⑤ CFRHS 50x50-3

Kuva 13. Hallin 2. sauvojen teräsprofiilit

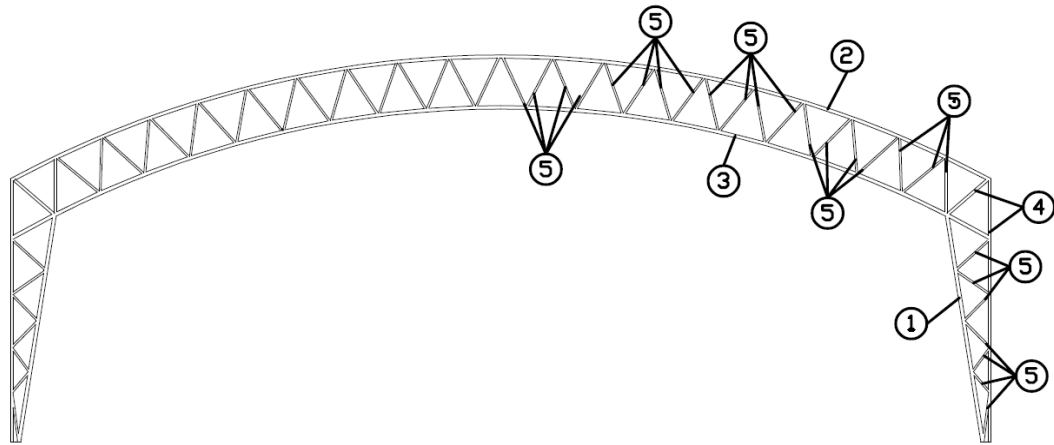


- ① 150x175 C30
- ② 175x200 C30
- ③ 125x225 C30
- ④ 100x100 C30
- ⑤ 100x150 C30
- ⑥ 75x100 C30
- ⑦ 100x75 C30

Kuva 14. Hallin 2. sauvojen poikkileikkaukset

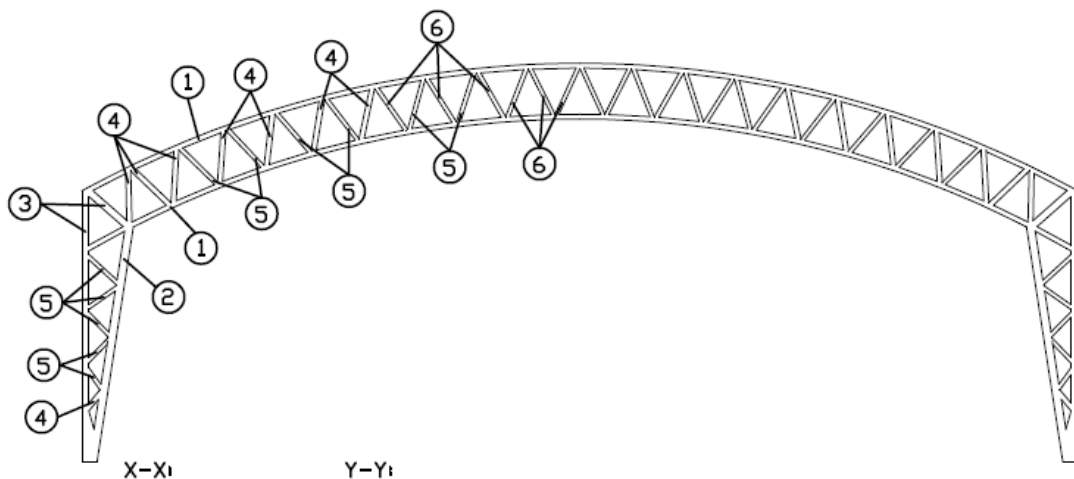
5.1.3 Halli 3

Hallin 3. rakennemallit (kuvat 15 ja 16) pystyttiin myös säilyttämään hyvin samanlaisina.



- ① CFRHS 90×90-4
- ② CFRHS 80×80-3
- ③ CFRHS 90×90-3
- ④ CFRHS 70×70-3
- ⑤ CFRHS 50×50-3

Kuva 15. Hallin 3. sauvojen teräsprofiilit

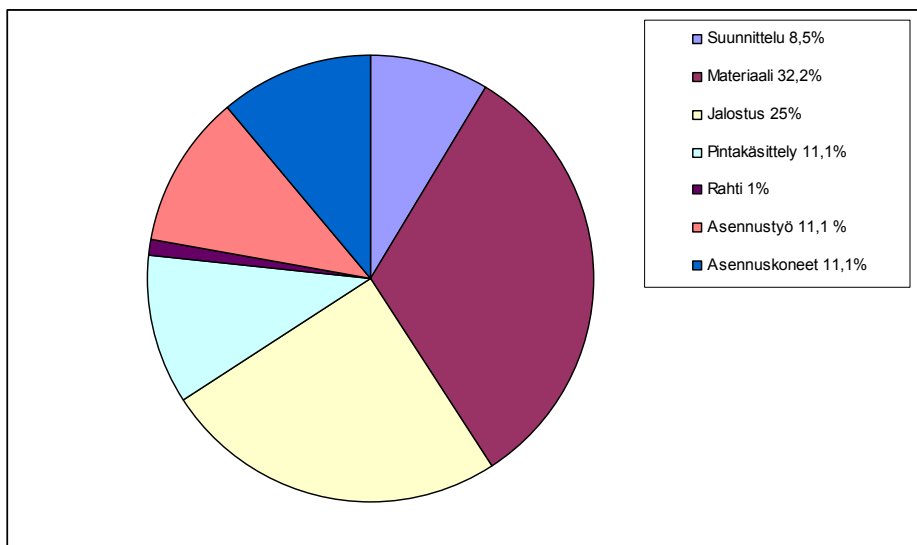


- | | |
|------------------|------------------|
| X-X ₁ | Y-Y ₁ |
| ② 150×200 C30 | ① 200×125 C30 |
| ③ 125×175 C30 | |
| ④ 100×125 C30 | |
| ⑤ 75×100 C30 | |
| ⑥ 50×100 C30 | |

Kuva 16. Hallin 3. sauvojen poikkileikkaukset

5.2 Ristikkorakenteiden hinnan muodostuminen

Tyypillisen teräsrakenteen hinta voisi muodostua seuraavista tekijöistä, prosenttiosuuksineen koko hinnasta, kuva (14). Prosenttiosuudet pitänevät melko hyvin paikkansa myös tällä uudella sormiliimaliitostekniikalla tehtävissä puisilla ristikkorakenteilla. Puulla kuitenkin materiaalin osuus kasvaa määräävämmäksi n.45 %:iin, jalostuksen, eli työn ja pintakäsittelyn osuuksien pienentyessä. Pintakäsittelyä ei puisissa rakenteissa usein käytetä ollenkaan. (Teräsrakenne CD)



Kuva 14. Hinnan muodostuminen prosenttiosuuksina

5.3 Hintavertailun laskelmat

Hallien kehien tiedot on kerätty oheisiin taulukoihin (4 – 6), joista selviävät käytetyt poikkileikkaukset, niiden lukumäärä, yksittäisen profiilin yhteenlaskettu pituus ja paino. Hallin puurakenteisessa versiossa on laskettu myös yksittäisten poikkileikkausten kuutiomäärä. Sauvojen kappalemäärät ja pituudet on otettu kyseessä olevan hallin mallista, jonka keskilinjaesityksen tiedoilla päästään riittävään tarkkuuteen, niin sauvojen tietojen kuin hinnankin suhteen. Hinnat kehillä määräytyvät teräksellä teräskilojen mukaan, kun taas puurakenteiden hinnat on laskettu käyttäen sahatavaran kuutiohintaa. Laskelmissa on käytetty seuraavia hintatietoja:

- Teräs 2 €/kg
- Puu 500 €/m³

Taulukon alareunaan on laskettu yksittäisen kehän hinta, sekä koko hallin kaikkien kehien hinnat yhteensä. Näiden tietojen avulla saatiin laskettua teräs- ja puurakenteisen hallin hintaero, joka on ilmoitettu sekä euroina että prosentteina.

Taulukko 4. Hallin 1. hintavertailu.

Halli 1		jänneväli on 15 m hallin pituus 36 m		Maastoluokka II	
Teräs:					
*Kehäväli 4 m =		10	Kehää		
Profiili:	kpl	m		kg	
RHS 70x70-3		46		50,625	310,331
RHS 80x80-3		12		11,153	78,85
RHS 60x40-3		38		43,217	183,671

Halli 1. on mitoitettu myös 3 m kehävälillä, jolloin sauvoissa vaikuttavat voimat ja siten myös käytettyjen poikkileikkausten koot pienenevät huomattavasti, mutta kehien lukumäärä kasvaisi siinä tapauksessa kolmeentoista. Puun kuutiomäärä laski n. 1,28 kuutioon ja siten yksittäisen kehän hinnaksi muodostui n. 640€ Hintaero teräskehäiseen halliin verrattuna kuitenkin pieneni n. 27 prosenttiin. Voimien ja poikkileikkausten pieneneminen ei kompensoinut rakenteeseen tulevien lisäkehien puumäärää.

Taulukko 5. Hallin 2. hintavertailu

Halli_2				
jänneväli on 20m				
hallin pituus 48m			Maastoluokka III	
Teräs:				
*Kehäväli 4m =		13	Kehää	
Profiili:	kpl	m	kg	
RHS 50x50-3		40	51,347	218,225
RHS 60x60-3		2	2,567	13,323
RHS 80x80-3		32	38,145	269,687
RHS 100x100-4		10	12,013	140,55
RHS 90x90-3		21	19,124	153,183
kg yht.			794,968	
€/kg			2	
Hinta:	1589,9 €			
Kaikki kehät:	20669,2 €			

Puu:					
*Kehäväli 4m =		13	Kehää		
Profiili:	kpl	m	kg		m3
125x225 C30		22	20,465	299,307	0,575578125
75x100 C30		24	28,456	113,099	0,21342
150x175 C30		33	38,941	531,542	1,02220125
175x200 C30		8	11,963	212,75	0,418705
100x150 C30		8	9,292	72,48	0,13938
100x100 C30		10	11,777	61,239	0,11777
		kg yht.	1290,417		
		m3 yht.	2,487054375		
		€/m3	500		
Hinta:	1243,5 €				
Kaikki kehät:	16165,9 €				
HINTAERO:	4503 €				
Hintaero %	21,8 %				
	Halvempi				

Halli 2. mitoitettiin myös eri kehävälillä. Pidemmän jännevälin takia pienennettiin kehäväli kahteen metriin, jolloin voimat pienenevät merkittävästi. Yksittäisen kehän hinta vähenikin n. 720€n ja puukuutioita on vain n. 1,44 kuutiota. Koko hallin rakenteessa kehien määrä kasvoi 13:ta 25:een. Tässäkään tapauksessa ei kehävälin pienentäminen tuonut toivottua etua hinnassa, vaan hintaero pieneni n. 13 prosenttiin.

Taulukko 6. Hallin 3. hintavertailu

Halli_3 jänneväli on 25m, kaarihalli hallin pituus 52m Maastoluokka III				
Teräs:				
*Kehäväli 3m =	18	Kehää		
Profiili:	kpl	m	kg	
RHS 80x80-3	39		26,539	187,634
RHS 90x90-4	8		11,941	125,381
RHS 50x50-3	52		69,148	293,877
RHS 70x70-3	12		16,381	100,419
RHS 90x90-3	39		25,425	203,635
	kg yht.		910,946	
	€/kg		2	
Hinta:	1821,892	€		
Kaikki kehät:	32794,056			

Puu:					
*Kehäväli 3m =	18	Kehää			
Profiili:	kpl	m	kg	m3	
125x200 C30	78	51,964	675,536	1,2991	
150x200 C30	8	11,941	212,36	0,35823	
75x100 C30	22	27,515	107,307	0,2063625	
100x125 C30	16	21,749	141,664	0,2718625	
125x175 C30	14	18,864	214,581	0,41265	
50x100 C30	12	17,356	45,125	0,08678	
	kg yht.	1396,573			
	m3 yht.	2,634985			
	€/m3	500			
Hinta:	1317,4925	€			
Kaikki kehät:	23714,865	€			
HINTAERO:	9079	€			
Hintaero %	27,7	%	Halvempi		

6 Johtopäätökset ja lopputulos

Kokonaisuutena kaikkien kehien sauvojen poikkileikkaukset saatiin mitoitettua, vaikka mallien muodostuksessa olikin jotain ongelmia. Mallit kuvaavat kuitenkin kohtuullisen hyvin todellisia rakenteita ja vertailuasetelma kehien välillä on hyvin tasavertainen. Vertailun tulokset ovat puurakenteiden kannalta rohkaisevia ja niihin voidaan olla tyytyväisiä. Puiset kehät tulivat jokaisessa vertailun tapauksessa selvästi edullisemmiksi. Kustannukset ovat hyvin linjassa toistensa kanssa, sekä kaarimallin, että harjakehän eroavaisuudet ovat kuitenkin selkeät. Kaarimalli on rakenteensa ja voimien jakautumisen kannalta selkeästi paras malli, mutta tämän vertailun halleissa uuman sauvojen tiheä jakon nosti sen hintaa muihin verrattuna. Etenkin teräsrakenteisessa kaaressa uuman sauvojen osuus on merkittävä syy huomattavaan hinnan nousuun pienempien jännevälien kehiin verrattuna. Toisaalta on luonnollista, että jännevälin pidentyessä uuman sauvojen osuus koko rakenteen painosta kasvaa. Kaaren mallin optimointi ja lisä tutkiminen olisi kuitenkin varmasti pienentänyt tätä eroa. Kaaren uuman osalla olisi voitu koittaa mallia, jossa diagonaalijako on harvempi, tai käytetään vertikaaleja jolloin uuman sauvojen osuus rakenteessa olisi selvästi pienentynyt. Näidenkin laskelmien perusteella nähdään kuitenkin selkeä ero hinnassa puun ja teräsrakenteiden välillä.

Taulukosta (7) nähdään yksittäisen puisen ja teräsrakenteisen kehän kustannukset neliötä kohti. Teräsrakenteisten hallien 1. ja 2. kustannukset neliötä kohti ovat hyvin linjassa toistensa kanssa, joten voidaan olettaa mallien olevan vertailun kannalta melko onnistuneet. Puurakenteisilla halleilla taas voidaan havaita jännevälin kasvattamisen nostavan myös kehien hintaa johdonmukaisesti. Hallin 3. kehää ei kuitenkaan, edellä mainituista syistä ja täysin erilaisen rakennemallin vuoksi, kannata verrata pienempien jännevälin harjakehiin.

Taulukko 7. Hallinrakenteen kustannukset neliötä kohti yhden kehän osalta

	€/m ² teräs	kg/m ² teräs	€/m ² puu	m ³ /m ² puu
Halli 1.	19,1	9,5	12,1	0,024
Halli 2.	19,9	9,9	15,5	0,031
Halli 3.	24,3	12,1	17,6	0,035

Näiden tuloksien avulla ei kuitenkaan vielä voida päätellä rajaa, jossa puurakenteinen kehä ei olisi enää teräsrakenteista kehää edullisempi. Tätä hintavertailua olisikin kiinnostava laajentaa selvittämään tämä raja, sekä kattamaan myös hallien rakenteissa usein käytettävien kolminivelkehien kustannukset.

Kuten vertailun laskelmista voidaan havaita, tulivat puiset kehät kaikissa vertailun tapauksissa edullisemmiksi. Havaittiin myös, että kehävälin pienentäminen ei ole edullinen ratkaisu, sillä kehien määrä kasvattaa kokonaishintaa merkittävästi. Tuloksien valossa sormiliimaliitoksilla toteutettuja suurempiakin ristikkokehäisiä puurakenteisia halleja on kuitenkin mahdollista toteuttaa edullisesti. Kaiken kaikkiaan tällä uudella liitostekniikalla toteutettavat ristikkorakenteisten hallinkehien voidaan todeta tämän vertailun perusteella olevan erittäin kilpailukykyisiä rakenteita.

Lähteet

Kevarinmäki, A. & Oksanen, T; 2007; RIL 205-1-2007 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

Kurkela, J.; Lahtinen, R.; Muilu, J. & Mäki-Ketälä, L. 1996; STEP 1 Puurakenteet. Helsinki: Rakennustieto Oy

Kähkönen, L. 1997. Kantavat puurakenteet –insinööriopetus. 5. toisen uusitun painoksen muuttumaton painos. Helsinki: Rakennustieto Oy

Lilja, R. Teräsrakenne CD, Teräsrakenteiden opintomateriaali TAMK

Lähteenmäki, Matti. FEM – ristikko ja kehärakenteet. Rakenne ATK- luentomoniste TAMK

Poutanen, Tuomo 2009. Puun liimaliitoksista. [viitattu 19.4.2010]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/kirjasto/puupaiva-2009>

Poutanen, Tuomo, Puun ominaisuudet ja lajittelu. TTKK.

Puiset ristikot. Luentojen verkkomateriaali. TTKK 2006 [viitattu 19.4.2010] Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Yksikot/Talo/opetus/prp/prp2006/luennot/Luento6/>

Puurakenteiden suunnittelu Lyhennetty suunnitteluohje. 2010. [viitattu 19.4.2010]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/kirjasto/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu>

SFS-EN-1995-1-1 AC1+AC2 2008. Puurakenteiden suunnittelu. Helsinki: Suomen standardoimisliitto

Liitteet

Liite 1. MathCAD puusauvojen laskentapohja

Liite 2. Halli 1 tuuli- ja lumikuormien laskenta

Liite 3. Halli 2 tuuli- ja lumikuormien laskenta

Liite 4. Halli 3 tuuli- ja lumikuormien laskenta

Liite 5. Janus Oy:n rakennekuva hallista 1

SAUVAN MITOITUS: Murtorajatila

Sauva nro.ESIM

Sauvan ominaisuudet:

$$L_{\text{ef}} := 1500 \quad L_{\text{ef}} := 0.8 \cdot L = 1200$$

$$b_1 := 100 \quad h_1 := 100$$

(y - y) on vahvempi suunta, jossa taivutusta!

$$A := b_1 \cdot h_1 = 10000$$

Pinta-ala

$$I_y := b_1 \cdot \frac{h_1^3}{12} = 8333333.33$$

Jäyhyysmomentti

$$I_z := h_1 \cdot \frac{b_1^3}{12} = 8333333.33$$

$$W_y := b_1 \cdot \frac{h_1^2}{6} = 166666.67$$

Taivutusvastus

$$W_z := h_1 \cdot \frac{b_1^2}{6} = 166666.67$$

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 28.87$$

Jäyhyyssäde

$$i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 28.87$$

$$\lambda_y := \frac{L_{\text{ef}}}{i_y} = 41.57$$

Hoikkuus

$$\lambda_z := \frac{L_{\text{ef}}}{i_z} = 41.57$$

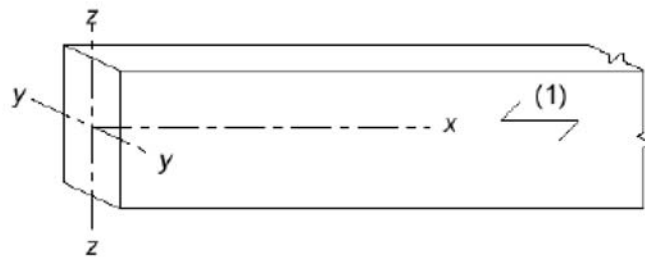
Sauvassa vaikuttavat voimat: WinStatic kehäohjelmasta.

Puristus $N_c := 70000$ N Taivutus $M_{yd} := 350000$ Nmm (Vahvempi suunta)

Veto $N_v := 00$ N $M_{zd} := 00$ Nmm (Heikompi suunta)

Leikkaus $V_d := 00$ N

Leikkaus $N_t := 00$ N

**Selite:**

(1) syysuunta

Kuva 6.1 Sauvan akselit

$$\gamma_M := 1.4 \quad k_{\text{mod}} := 0.9 \quad \text{Käyttöluokka: 2, Aikaluokka: lyhytaikainen}$$

Lujuusluokka: C30

-Taivutus	$f_{m.k} := 30$	$f_{m.d} := \frac{k_{mod} \cdot f_{m.k}}{\gamma_M} = 19.29$
-Veto	$f_{t.0.k} := 18$	$f_{t.0.d} := \frac{k_{mod} \cdot f_{t.0.k}}{\gamma_M} = 11.57$
	$f_{t.90.k} := 0.6$	$f_{t.90.d} := \frac{k_{mod} \cdot f_{t.90.k}}{\gamma_M} = 0.39$
-Puristus	$f_{c.0.k} := 23$	$f_{c.0.d} := \frac{k_{mod} \cdot f_{c.0.k}}{\gamma_M} = 14.79$
	$f_{c.90.k} := 2.7$	$f_{c.90.d} := \frac{k_{mod} \cdot f_{c.90.k}}{\gamma_M} = 1.74$
-Leikkaus	$f_{v.k} := 3.0$	$f_{v.d} := \frac{k_{mod} \cdot f_{v.k}}{\gamma_M} = 1.93$

Kimmomoduuli:

Liukumoduuli:

$E_{0.mean} := 12000$

$E_{0.05} := 8000$

$E_{90.mean} := 400$

$G_{mean} := 750$

Veto syysuuntaan: 6.1.2

$\sigma_{t.0.d} \leq f_{t.0.d}$

$\sigma_{t.0.d} := \frac{N_v}{A} = 0$

$f_{t.0.d} = 11.57$

$\frac{\sigma_{t.0.d}}{f_{t.0.d}} = 0$

Puristus syysuuntaa: 6.1.4

$\sigma_{c.0.d} \leq f_{c.0.d}$

$\sigma_{c.0.d} := \frac{N_c}{A} = 7$

$f_{c.0.d} = 14.79$

$\frac{\sigma_{c.0.d}}{f_{c.0.d}} = 0.47$

Taivutus: 6.1.6

$\frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.y.d}} \leq 1$

$\sigma_{m.y.d} := \frac{M_{yd}}{W_y} = 2.1$

$\frac{\sigma_{m.y.d}}{f_{m.d}} = 0.11$

$f_{m.d} = 19.29$

$\sigma_{m.z.d} := \frac{M_{zd}}{W_z} = 0$

$\frac{\sigma_{m.z.d}}{f_{m.d}} = 0$

Leikkaus: 6.1.7

$$\tau_d := \frac{V_d}{A} = 0$$

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = 0$$

Yhdistetty taivutus ja veto: 6.2.3

(Taivutusta vain y suunnassa)

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.11$$

Yhdistetty taivutus ja aksiaalinen puristus: 6.2.4

(Taivutusta vain y suunnassa)

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.33$$

Nurjahduskestävyys: 6.3.2

Nurjahdus tapahtuu heikompaan suunta, tarkistettava tapauskohtaisesti.

Suhteellinen hoikkuus: (Y suunta!)

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad \lambda_{rel,y} := \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0.71$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad \lambda_{rel,z} := \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0.71$$

Jos sekä $\lambda_{rel,y}$ ja $\lambda_{rel,z}$ ovat pienempiä kuin 0,3 jännitysten tulee täyttää ehdot "Taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutus poikkileikkauksessa" kohta 6.2.4

Muuten:

$$\beta_c := 0.2 \quad k_m := 0.7$$

$$k_y = 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] \quad k_y := 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] = 0.79$$

$$k_z = 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] \quad k_z := 0.5 \cdot \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] = 0.79$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 + \lambda_{rel,y}^2}}$$

$$k_{c,y} := \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 + \lambda_{rel,y}^2}} = 0.54$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 + \lambda_{rel,z}^2}}$$

$$k_{c,z} := \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 + \lambda_{rel,z}^2}} = 0.54$$

Mitoitustehto:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} = 0.99$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = 0.96$$

Taivutetun sauvan kiepahduskestävyys: 6.3.3

$$\sigma_{m,crit} := E_{0.05} \cdot \frac{0.78 \cdot b_1^2}{h_1 \cdot L_{ef}} = 520$$

$$\lambda_{m,rel} := \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0.24$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{kun } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{kun } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad k_{crit} := 1$$

Kun momentti vaikuttaa vahvemman akselin y suhteen, osoitetaan, että jännitykset täyttävät seuraavan ehdon:

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{(k_{crit} \cdot f_{m,d})} = 0.11$$

Jos palkkiin vaikuttaa vahvemman akselin suhteen vaikuttava momentti M_y ja puristus voima N_c yhdistelmä, osoitetaan, että jännitykset täyttävät seuraavan ehdon.

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} = 0.89$$

Tuulikuormat
Eurocode 1 Rakenteiden kuormat SFS - EN 1991-1-4

Oletukset :
Maastoluokka II
Hallissa on ovet molemmissa päädyissä

Tuulen puuskanopeuspaine rakennuksen korkeuden ollessa $z=9,775\text{m}$

$$v_b := 21 \quad \rho := 1.25$$

$$q_p = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 275.625 \quad q_p := 275.625$$

$$c_{e,z} := 2.2 \quad \text{Kuva 4.2 1991-1-4}$$

Puuskanopeuspaine

$$q_{p,z} = c_{e,z} \cdot q_p$$

$$c_{e,z} \cdot q_p = 606.375$$

$$q_{p,z} := 606.375 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

s.44 1991-1-4

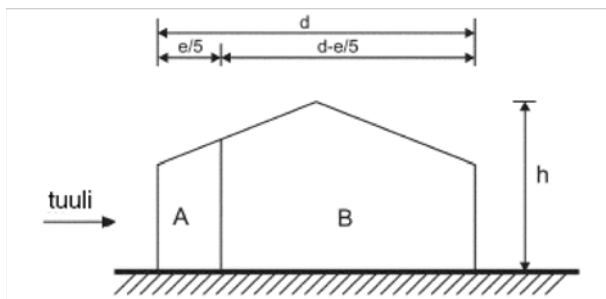
$$w_e = q_{p,z} \cdot c_{p,e}$$

Ulkopuolisen tuulenpaine rakennuksen pystyseinille
Tapaus 1

$$b_1 := 36.08 \quad d_1 := 15 \quad h := 9.775$$

$$e_1 = \min(b, 2h) \quad e_1 = 2h \quad e_1 := 19.55$$

$$e_1 \geq d_1$$



$$\frac{h}{d_1} = 0.652$$

$$A_1 := -1.2$$

$$B_1 := -0.8$$

$$D_1 := 0.8$$

$$E_1 := -0.5$$

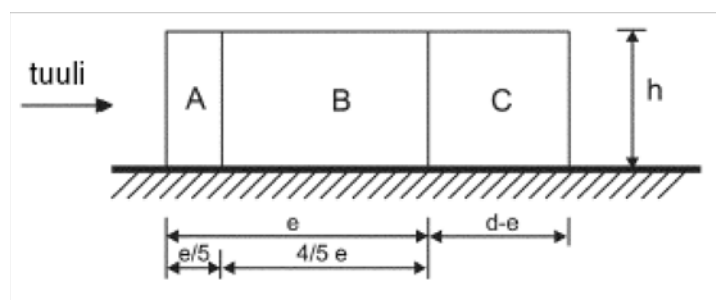
$$\frac{e_1}{5} = 3.91 \quad d_1 - \frac{e_1}{5} = 11.09 \quad 3.91 + 11.09 = 15$$

Ulkopuolisen tuulenpaine rakennuksen pystyseinille
Tapaus 2

$$b_2 := 15 \quad d_2 := 36.08 \quad h := 9.775$$

$$e_2 = \min(b, 2h) \quad e_2 = b \quad e_2 := 15$$

$$e_2 < d_2$$



$$\frac{h}{d_2} = 0.271$$

$$A_2 := -1.2$$

$$B_2 := -0.8$$

$$C_2 := -0.5$$

$$D_2 := 0.7$$

$$E_2 := -0.35$$

$$\frac{e_2}{5} = 3 \quad \frac{4}{5}e_2 = 12 \quad d_2 - e_2 = 21.08 \quad 3 + 12 + 21.08 = 36.08$$

Sisäpuolinen paine

s. 92 1991-1-4

Aukkosuhteen μ arviota ei ovoida perustella, joten käytetään sisäpuolisen paineen kertoimia:

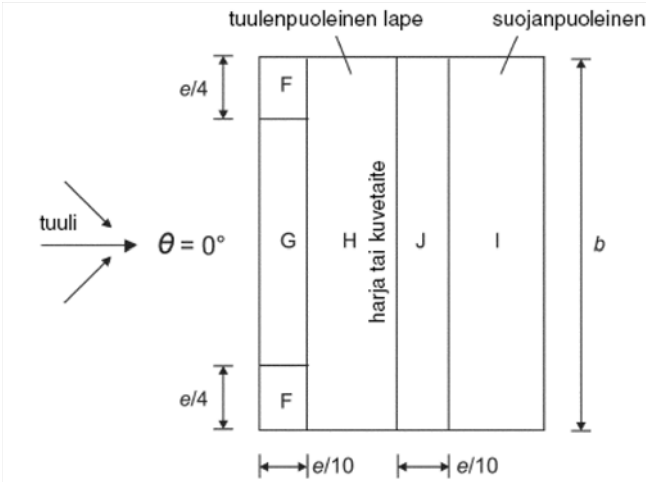
$$c_{pi1} = 0.2 \quad c_{pi2} := -0.3$$

Tuuli katolla, kun tuulen suunta $\alpha = 0$

$$b_1 = 36.08 \quad h := 9.775$$

$$e = \min(b, 2h) \quad e = 2h \quad e := 19.55$$

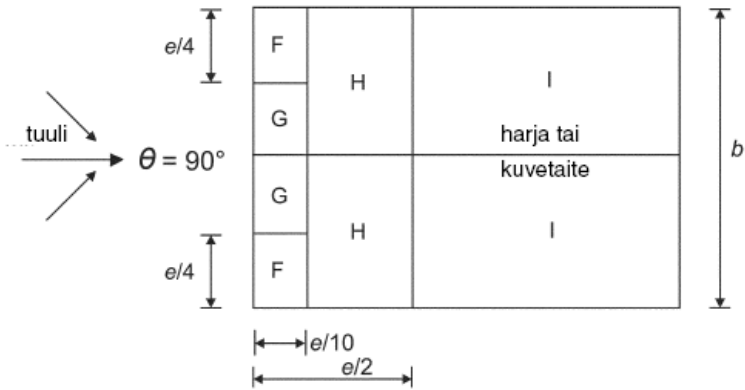
$$\frac{e}{4} = 4.888 \quad \frac{e}{10} = 1.955$$



$F_1 := -0.5$ $F_{11} := 0.7$
 $G_1 := -0.5$ $G_{11} := 0.7$
 $H_1 := -0.2$ $H_{11} := 0.4$
 $I_1 := -0.4$ $I_{11} := 0$
 $J_1 := -0.5$ $J_{11} := 0$

Tuuli katolla, kun tuulen suunta $\theta=90$

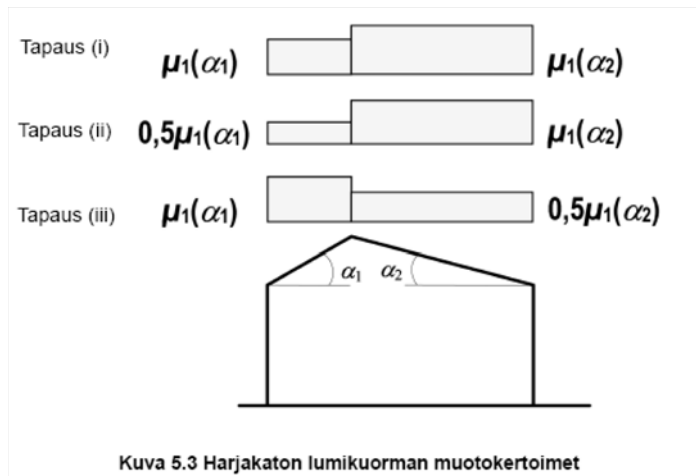
$b_2 = 15$ $h := 9.775$
 $e = \min(b, 2h)$ $e = b_2$ $e_p := 15$
 $\frac{e_p}{4} = 3.75$ $\frac{e_p}{10} = 1.5$ $\frac{e_p}{2} = 7.5$



$F_2 := -1.1$
 $G_2 := -1.4$
 $H_2 := -0.8$
 $I_2 := -0.5$

Lumikuormat

Eurocode 1 Rakenteiden kuormat SFS - EN 1991-1-3



$$s_k := 2.5 \quad \text{RIL 205-1997 kuva2.2.2.2a}$$

$$\mu_1 := 0.8 \quad \text{Kuva 5.1}$$

$$s = s_k \cdot \mu_1 \quad s = 2.5 \cdot 0.8 = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

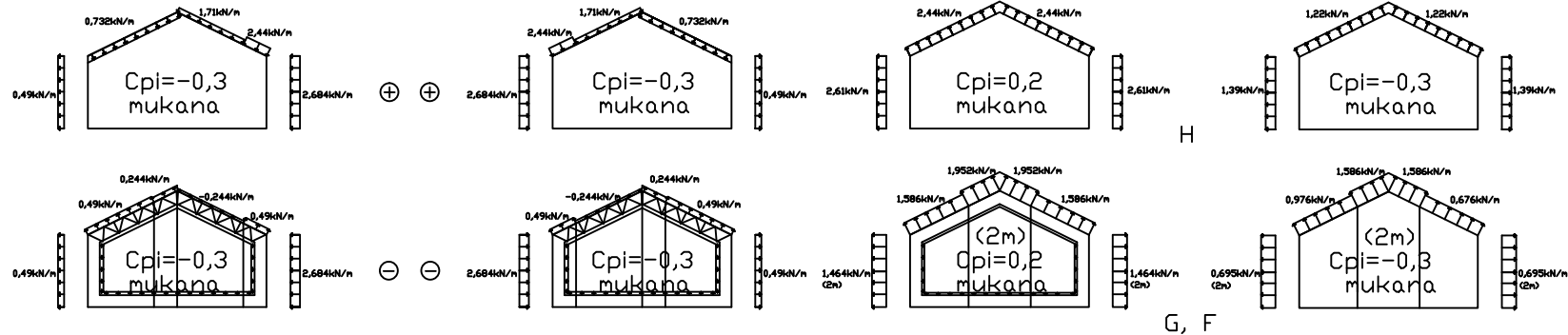
Rakenteiden painot:

Orsien painoksi on arvioitu n. 0,2 kN/m jolloin laskenta on varmemmalla puolella.

Laskennassa on myös otettava huomioon itse kehän oma paino.

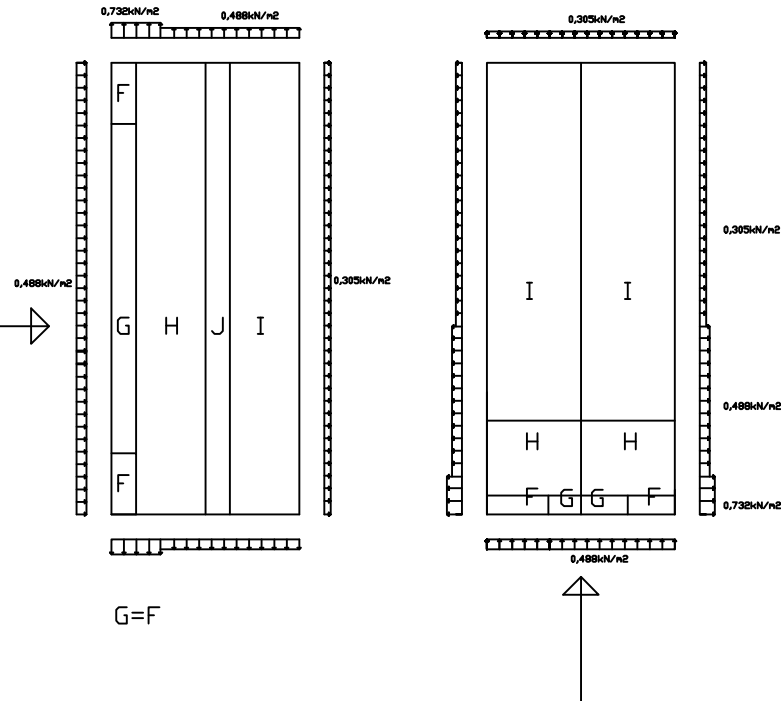
TUULI

$q(pz)=606,5 \text{ N/m}^2$ Maastoluokassa II



Tuulen suunta

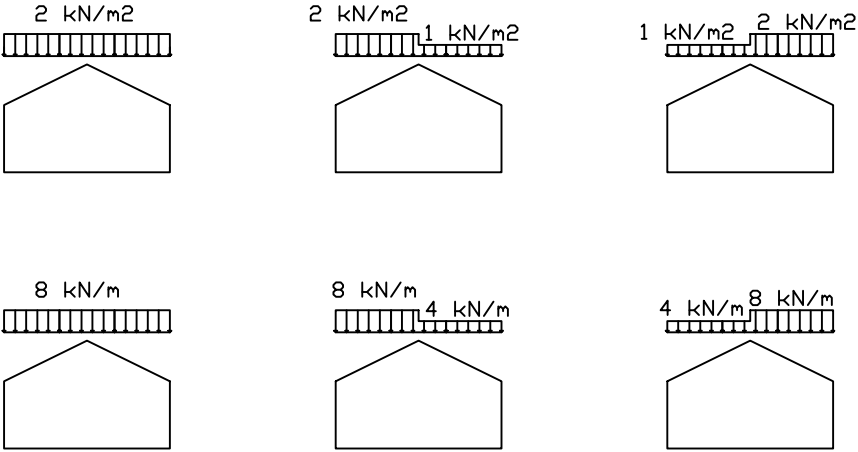
HUOM! Kaikki kuormat
4m jänneväliä laskettuna.



G=F

LUMI

HUOM! Kaikki alla olevat kuormat 4m jännevälille laskettuja viivakuormia.



Tuulikuormat

Eurocode 1 Rakenteiden kuormat SFS - EN 1991-1-4

Oletukset :

Maastoluokka III

Hallissa on isot nosto-ovet molemmissa päädyissä

Tuulen puuskanopeuspaine rakennuksen korkeuden ollessa $z=9,300\text{m}$

$$v_b := 21 \quad \rho := 1.25$$

$$q_p = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 275.625 \quad q_p := 275.625$$

$$c_{e,z} := 1.6 \quad \text{Kuva 4.2 1991-1-4}$$

Puuskanopeuspaine

$$q_{p,z} = c_{e,z} \cdot q_p$$

$$c_{e,z} \cdot q_p = 441$$

$$q_{p,z} := 441 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

s.44 1991-1-4

$$w_e = q_{p,z} \cdot c_{p,e}$$

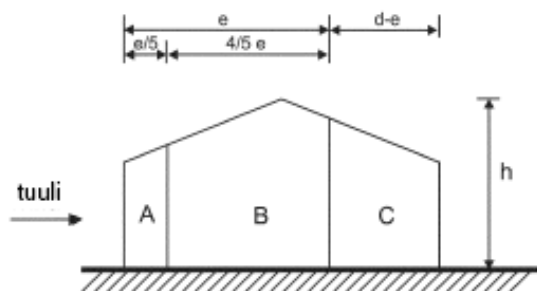
Ulkopuolisen tuulenpaine rakennuksen pystyseinille

Tapaus 1

$$b_1 := 48 \quad d_1 := 20 \quad h := 9.300$$

$$e_1 = \min(b, 2h) \quad e_1 = 2h \quad e_1 := 18.6$$

$$e_1 < d_1$$



$$\frac{h}{d_1} = 0.465$$

$$A_1 := -1.2$$

$$B_1 := -0.8$$

$$C_1 := -0.5$$

$$D_1 := 0.8$$

$$E_1 := -0.5$$

$$\frac{e_1}{5} = 3.72 \quad \frac{4e_1}{5} = 14.88 \quad d_1 - e_1 = 1.4 \quad 3.72 + 14.88 + 1.4 = 20$$

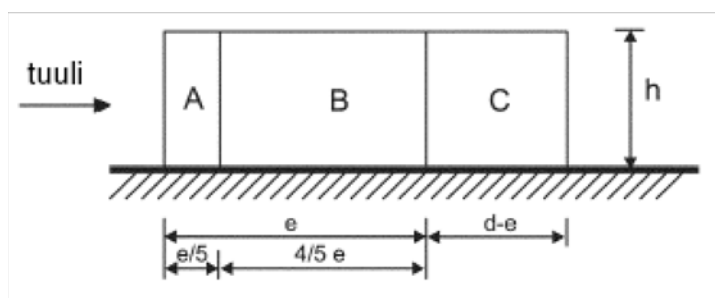
Ulkopuolisen tuulenpaine rakennuksen pystyseinille
Tapaus 2

$$b_2 := 20 \quad d_2 := 48.08 \quad h := 9.300$$

$$e_2 = \min(b, 2h) \quad e_2 = 2h \quad e_2 := 18.6$$

$$\frac{h}{d_2} = 0.193$$

$$e_2 < d_2$$



$$A_2 := -1.2$$

$$B_2 := -0.8$$

$$C_2 := -0.5$$

$$D_2 := 0.7$$

$$E_2 := -0.3$$

$$\frac{e_2}{5} = 3.72 \quad \frac{4}{5}e_2 = 14.88 \quad d_2 - e_2 = 29.48 \quad 3.72 + 14.88 + 29.48 = 48.08$$

Sisäpuolinen paine

s. 92 1991-1-4

Aukkosuhteen μ arviota ei voida perustella, joten käytetään sisäpuolisen paineen kertoimia:

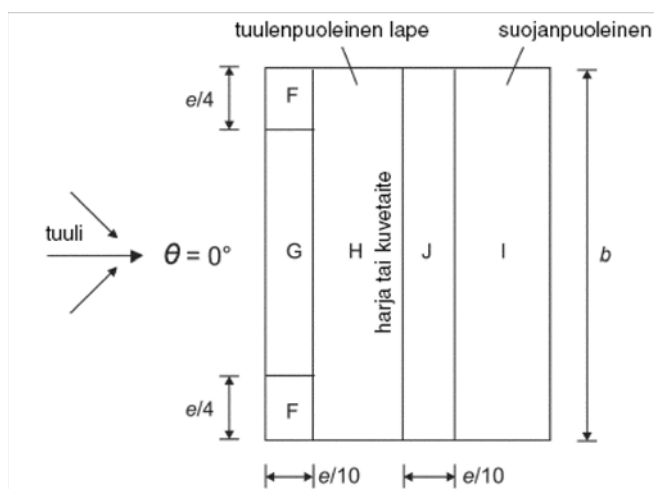
$$c_{pi1} = 0.2 \quad c_{pi2} := -0.3$$

Tuuli katolla, kun tuulen suunta $\alpha = 0$

$$b_1 = 48 \quad h := 9.300$$

$$e = \min(b, 2h) \quad e = 2h \quad e := 18.6$$

$$\frac{e}{4} = 4.65 \quad \frac{e}{10} = 1.86$$



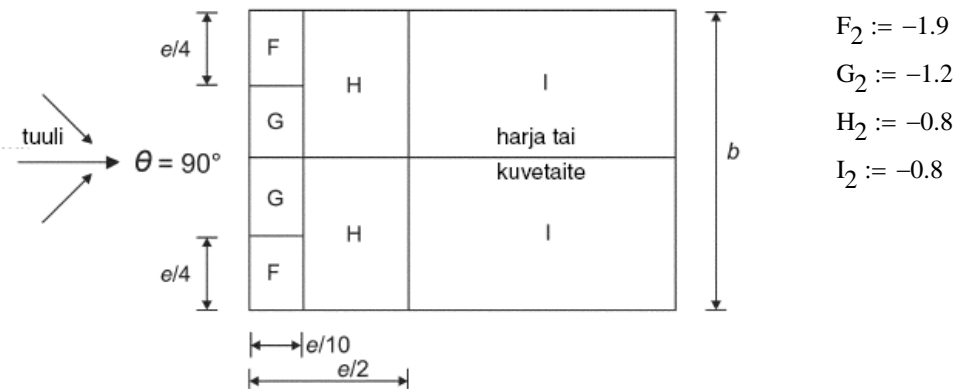
$$\begin{aligned} F_1 &:= -0.9 & F_{11} &:= 0.2 \\ 0.9 \quad G_1 &:= -0.8 & G_{11} &:= 0.2 \\ H_1 &:= -0.3 & H_{11} &:= 0.2 \\ I_1 &:= -0.4 & I_{11} &:= 0 \\ J_1 &:= -1.0 & J_{11} &:= 0 \end{aligned}$$

Tuuli katolla, kun tuulen suunta $\theta = 90$

$$b_2 = 20 \quad h := 9.300$$

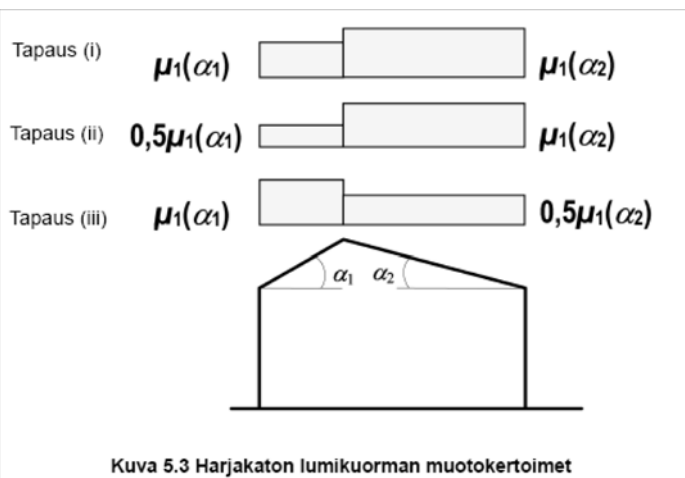
$$e = \min(b, 2h) \quad e = 2h \quad e_p := 18.6$$

$$\frac{e_p}{4} = 4.65 \quad \frac{e_p}{10} = 1.86 \quad \frac{e_p}{2} = 9.3$$



Lumikuormat

Eurocode 1 Rakenteiden kuormat SFS - EN 1991-1-3



$$s_k := 2.5 \quad \text{RIL 205-1997 kuva2.2.2.2a}$$

$$\mu_1 := 0.8 \quad \text{Kuva 5.1}$$

$$s = s_k \cdot \mu_1 \quad s = 2.5 \cdot 0.8 = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

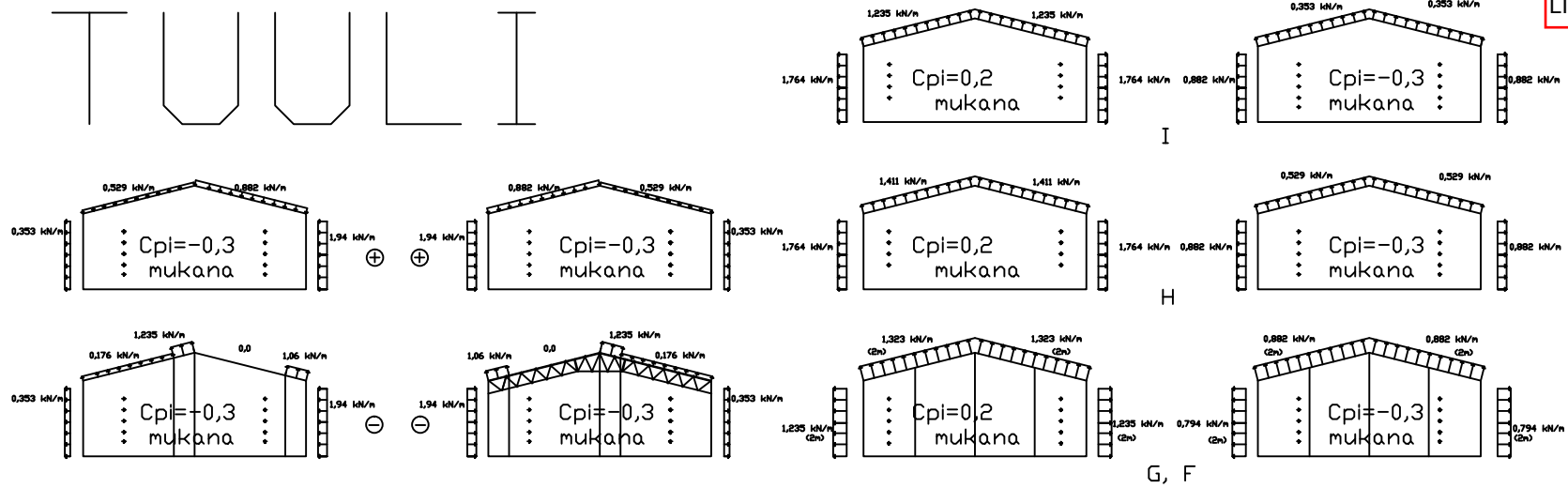
Rakenteiden painot:

Yläpaarteella päällä on rakenteita jotka aiheuttavat ristikkorakenteelle lisäkuormitusta. Näiden rakenteiden painoksi on arvioitu:

Arvio n. 0.2kN/m

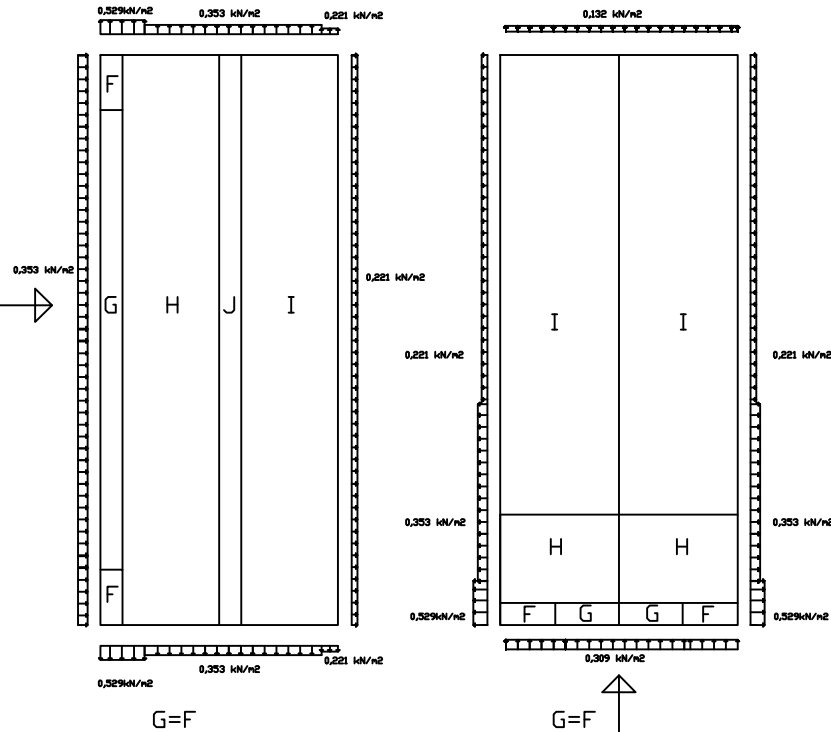
Laskennassa on myös otettava huomioon itse kehän oma paino.

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



Tuulen suunta →

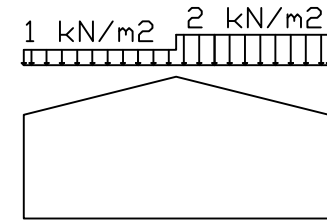
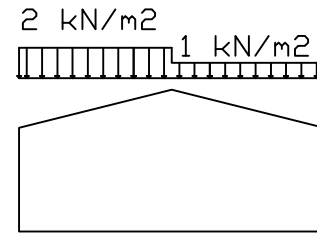
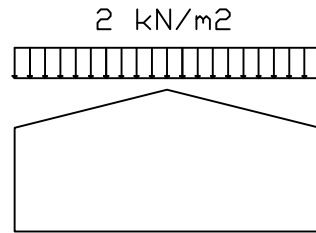
HUOM! Kaikki kuormat 4m jännevälille laskettuina!



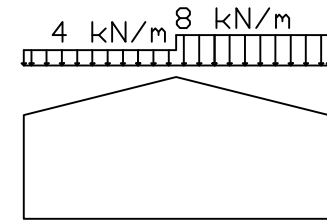
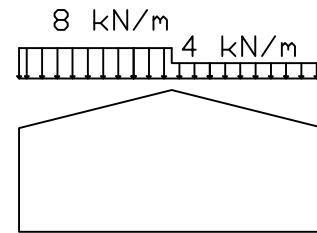
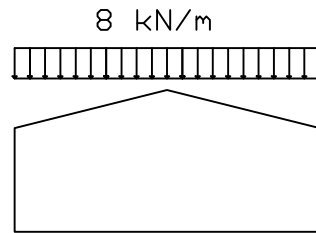
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

LUMI

HUOM! Kaikki kuormat 4m
jännevälille laskettuina!



,kun kehäväli on 4m!



Tuulikuormat
Eurocode 1 Rakenteiden kuormat SFS - EN 1991-1-4

Oletukset :
Maastoluokka III
Hallissa on isot nosto-ovet molemmissa päädyissä

Tuulen puuskanopeuspaine rakennuksen korkeuden ollessa $z=10,0\text{m}$

$$v_b := 21 \quad \rho := 1.25$$

$$q_p = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 275.625 \quad q_p := 275.625$$

$$c_{e,z} := 1.7 \quad \text{Kuva 4.2 1991-1-4}$$

Puuskanopeuspaine

$$q_{p,z} = c_{e,z} \cdot q_p$$

$$c_{e,z} \cdot q_p = 468.563$$

$$q_{p,z} := 470 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

s.44 1991-1-4

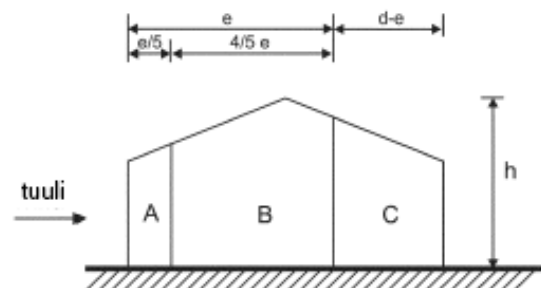
$$w_e = q_{p,z} \cdot c_{p,e}$$

Ulkopuolisen tuulenpaine rakennuksen pystyseinille
Tapaus 1

$$b_1 := 52 \quad d_1 := 25 \quad h := 10.0$$

$$e_1 = \min(b, 2h) \quad e_1 = 2h \quad e_1 := 20.0$$

$$e_1 < d_1$$



$$\frac{h}{d_1} = 0.4$$

$$A_1 := -1.2$$

$$B_1 := -0.8$$

$$C_1 := -0.5$$

$$D_1 := 0.8$$

$$E_1 := -0.5$$

$$\frac{e_1}{5} = 4 \quad \frac{4e_1}{5} = 16 \quad d_1 - e_1 = 5 \quad 4 + 16 + 5 = 25$$

Ulkopuolisen tuulenpaine rakennuksen pystyseinille

Tapaus 2

$$b_2 := 25$$

$$d_2 := 52$$

$$h := 10.0$$

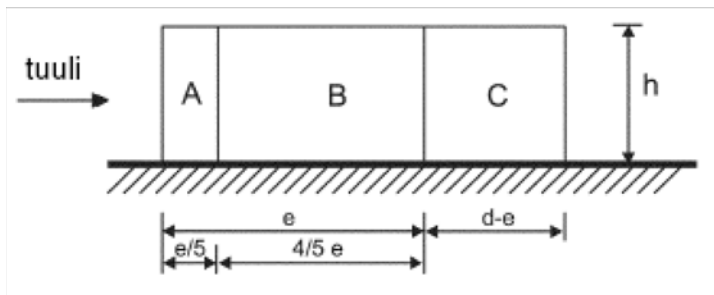
$$e_2 = \min(b, 2h)$$

$$e_2 = 2h$$

$$e_2 := 20$$

$$\frac{h}{d_2} = 0.192$$

$$e_2 < d_2$$



$$A_2 := -1.2$$

$$B_2 := -0.8$$

$$C_2 := -0.5$$

$$D_2 := 0.7$$

$$E_2 := -0.3$$

$$\frac{e_2}{5} = 4$$

$$\frac{4}{5}e_2 = 16$$

$$d_2 - e_2 = 32$$

$$4 + 16 + 32 = 52$$

Sisäpuolinen paine

s. 92 SFS EN 1991-1-4

Aukkosuhteen μ arviota ei voida perustella, joten käytetään sisäpuolisen paineen kertoimia:

$$c_{pi1} = 0.2$$

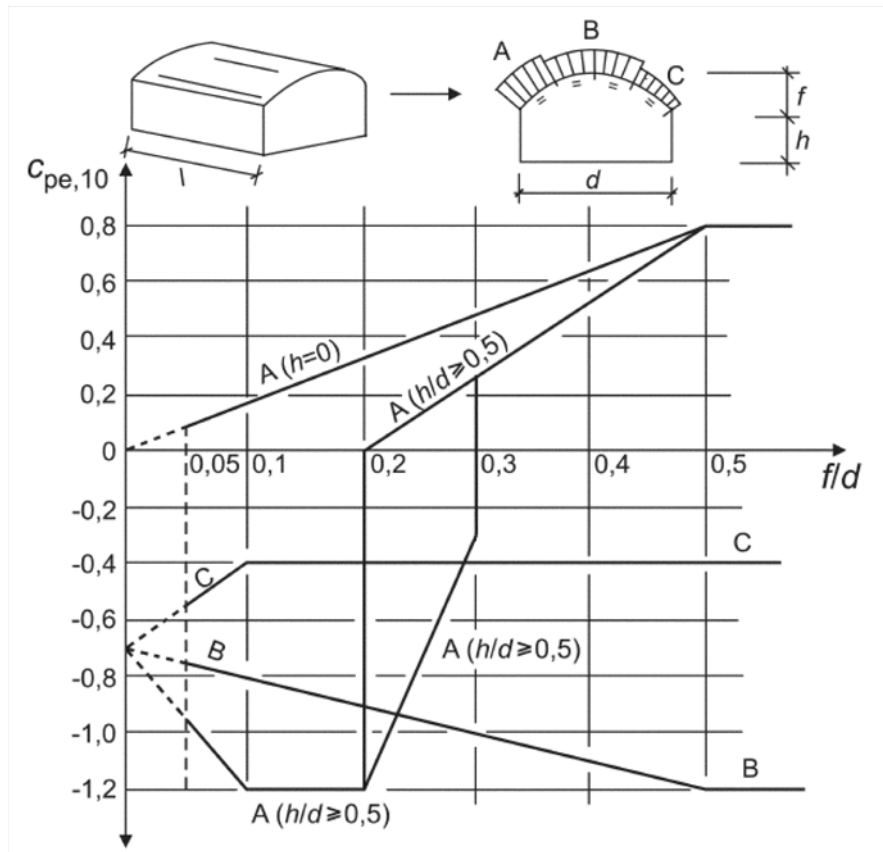
$$c_{pi2} := -0.3$$

Tuuli katolla, kun tuulen suunta $\alpha = 0$

$$d_t := 25$$

$$h_t := 6.800$$

$$f := 3.200$$



$$\frac{f}{d_t} = 0.128$$

$$\frac{h_t}{d_t} = 0.272$$

$$A = 0 \quad \text{tai}$$

$$A = -1.2$$

$$B = -0.82$$

$$C = -0.4$$

Ulkopuolisen paineen kertoimen $c_{pe,10}$ arvo saadaan lineaarisesti interpoloimalla, kun $0 < h/d < 0.5$.

Kun $0.2 \leq f/d \leq 0.3$ ja $h/d \geq 0.5$, joudutaan tarkastelemaan kahta painekertoimen $c_{pe,10}$ arvoa.

Diagrammi ei sovellu tasakatolle.

Kuva 7.11 Ulkopuolisen paineen kertoimien $c_{pe,10}$ suositusarvot pohjaltaan suorakaiteen muotoisille kaarikatoille

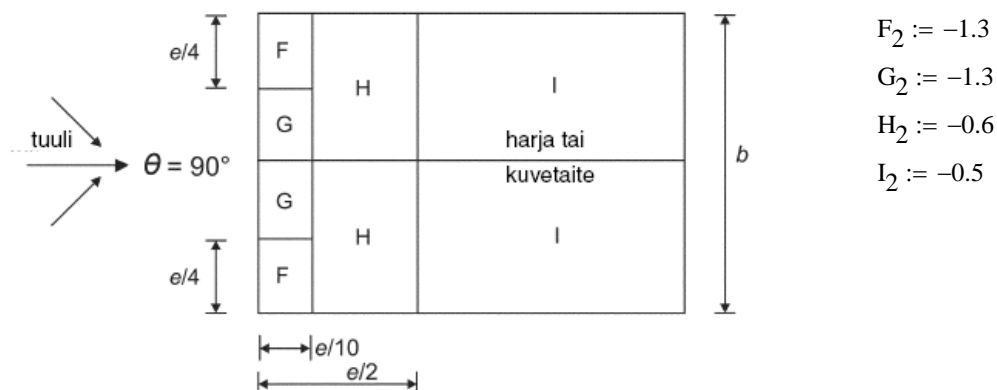
Tuuli katolla, kun tuulen suunta $\alpha = 90$

Eurokoodista ei löydy ohjetta kaarikatoille kun tuulen suuntana on rakennuksen pääty. Käytetään harjakaton vastaava ohjetta. Kaltevuus 14 astetta.

$$d_3 := 52 \quad h_3 := 10 \quad b_3 := 25$$

$$e = \min(b, 2h) \quad e = 2h \quad e_p := 20$$

$$\frac{e_p}{4} = 5 \quad \frac{e_p}{10} = 2 \quad \frac{e_p}{2} = 10$$



Lumikuormat

Eurocode 1 Rakenteiden kuormat SFS - EN 1991-1-3

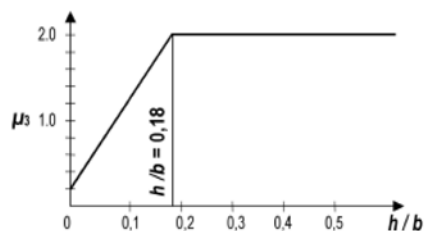
(1) Yhteen suuntaan kaarevien kattojen yhteydessä käytettävät lumikuorman muotokertoimet saadaan lumiasteiden puuttuessa seuraavista lausekkeista (ks. myös kuvaa 5.6).

$$\text{Kun } \beta > 60^\circ, \quad \mu_3 = 0 \quad (5.4)$$

$$\text{Kun } \beta \leq 60^\circ, \quad \mu_3 = 0,2 + 10 \, h/b \quad (5.5)$$

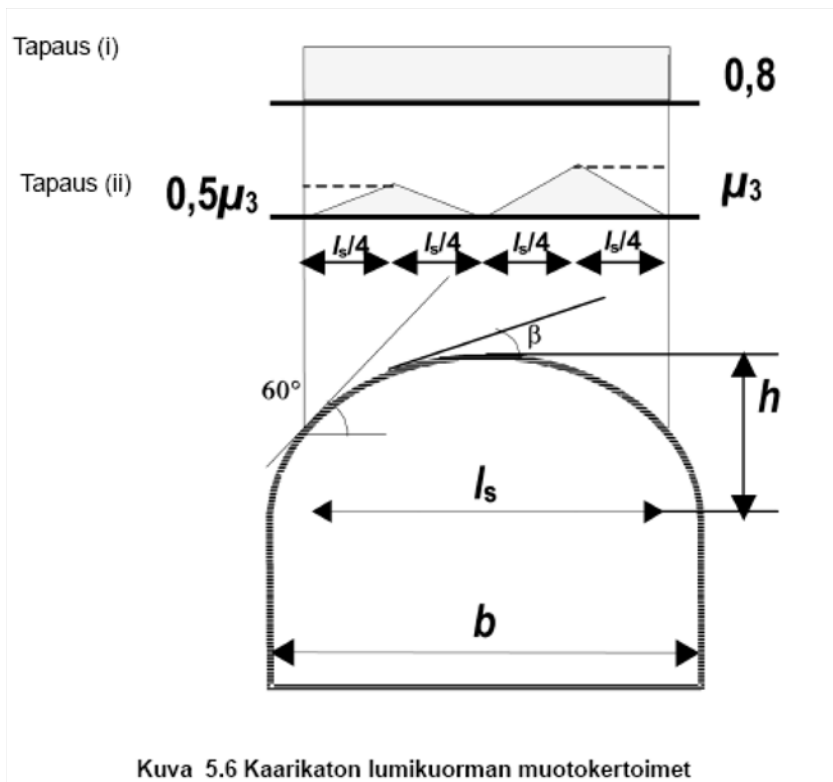
Kertoimen μ_3 yläraja on tarpeen määritellä.

HUOM. 1 Kertoimen μ_3 yläraja voidaan määritellä kansallisessa liitteessä. Kertoimen μ_3 suositeltava yläraja on 2,0 (ks. kuvaa 5.5).



Kuva 5.5 Kaarikattojen lumikuorman muotokertoimen suositeltava arvo nuolikorkeuden ja jännemitan suhteesta riippuen (kun $\beta \leq 60^\circ$)

$$\mu_3 := 0.2 + 10 \cdot \frac{3.2}{25} = 1.48 \quad \text{tässä tapauksessa} \quad l_s = b \quad s = s_k \cdot \mu_n \quad s_k := 2.5$$



Tapaus (i) $0,8 \cdot s_k = 2$

Tapaus (ii) $s_k \cdot \mu_3 = 3,7$ $s_k \cdot 0,5\mu_3 = 1,85$

Rakenteiden painot:

Rakenteiden painoihin on lisätty yläpaaretten päälle tulevista orsista ym. kuorma, joka on tarkoituksella arvioitu yläkanttiin varmuuden lisäämiseksi.

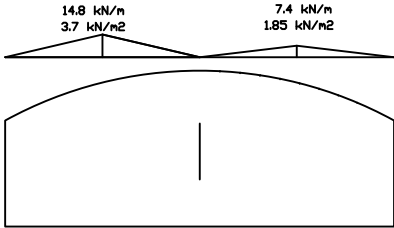
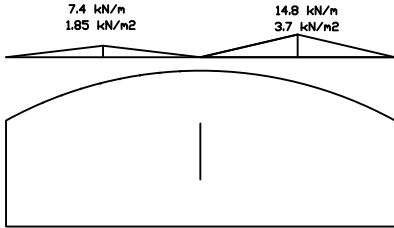
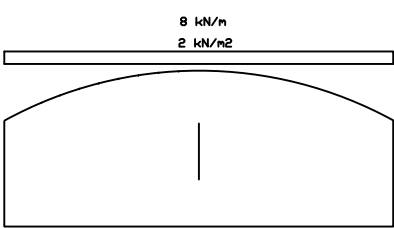
Arvio n. $0,2 \text{ kN/m}$

Laskennassa on myös otettava huomioon itse kehän oma paino.

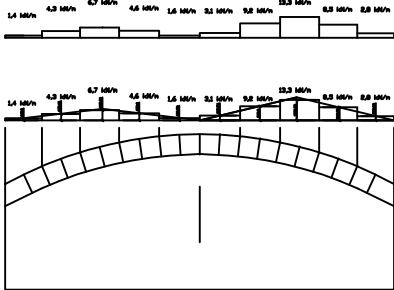
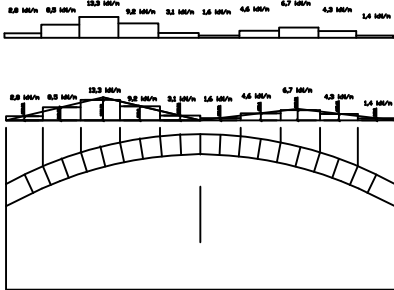
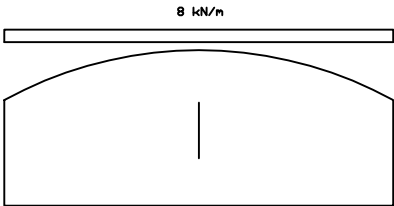


LUMI

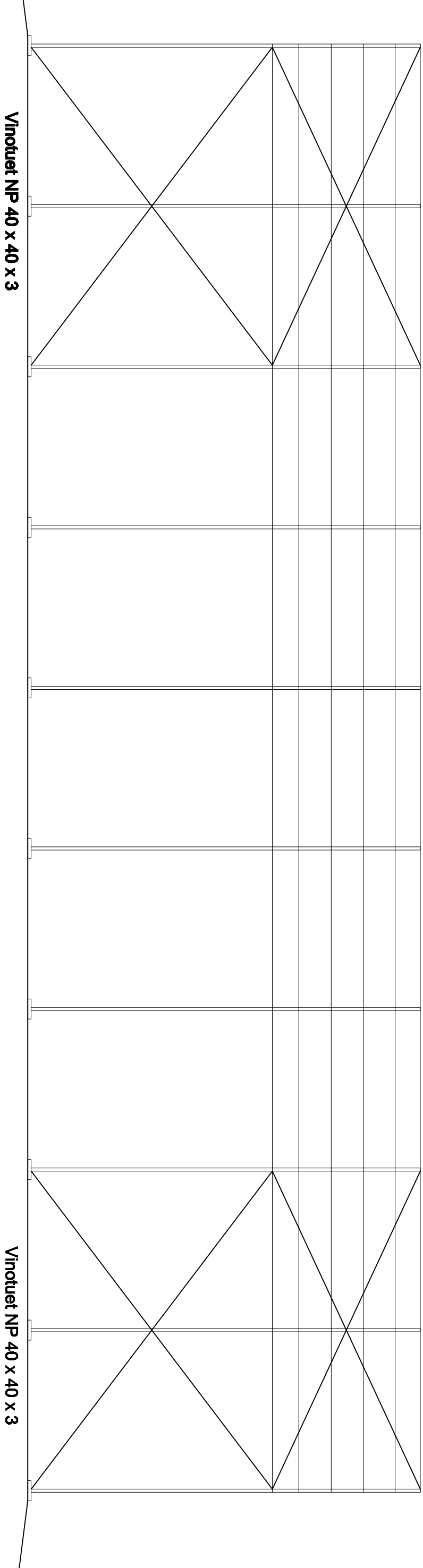
HUOM! Lumikuorman kolmiokuormat jaettu viideksi tasaiseksi kuormaksi, koska WinStatik-ohjelmassa kolmiokuormien syöttö ei onnistu.



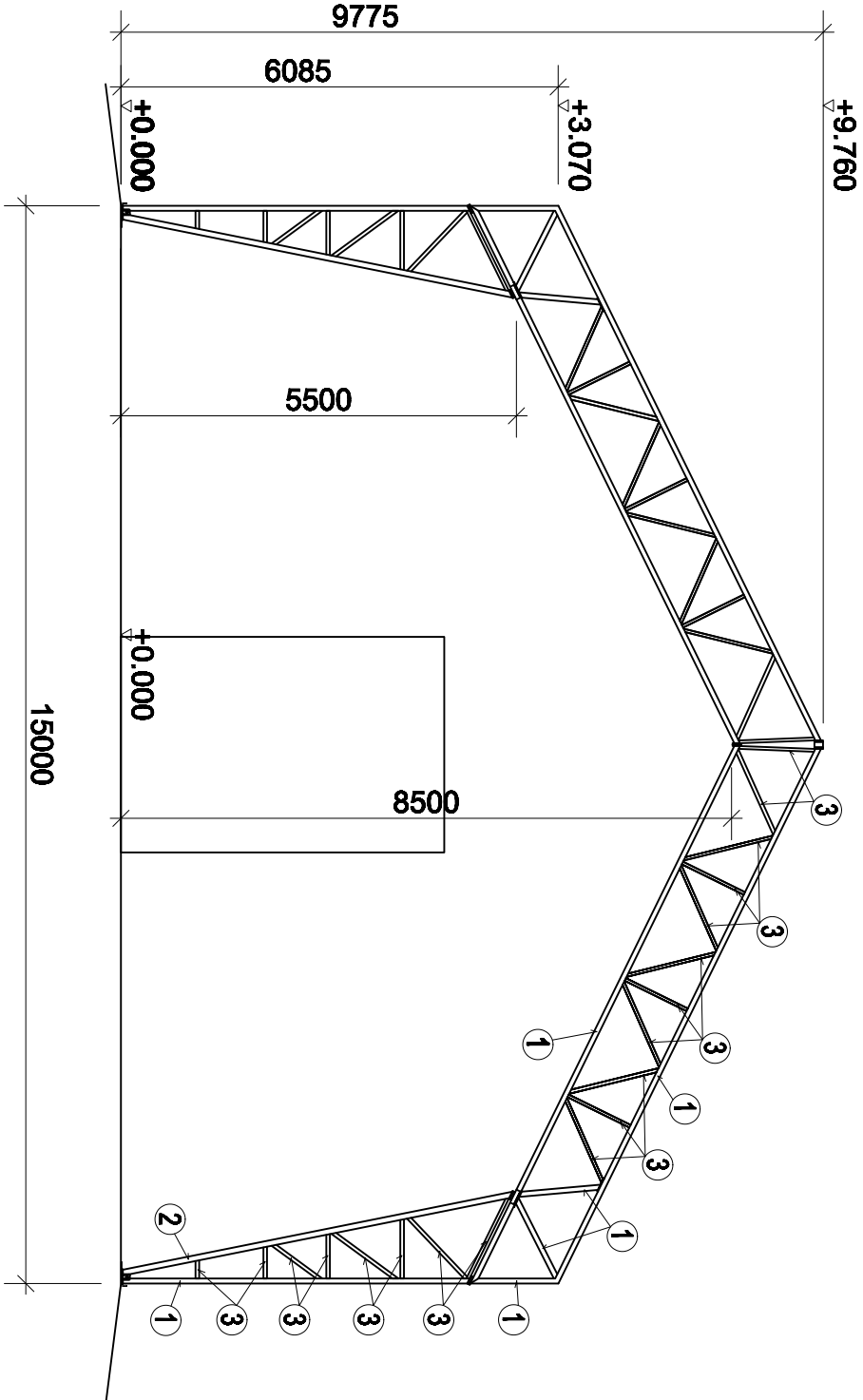
,kun kehäväli on 4m!



Sivupilivustus 1:100

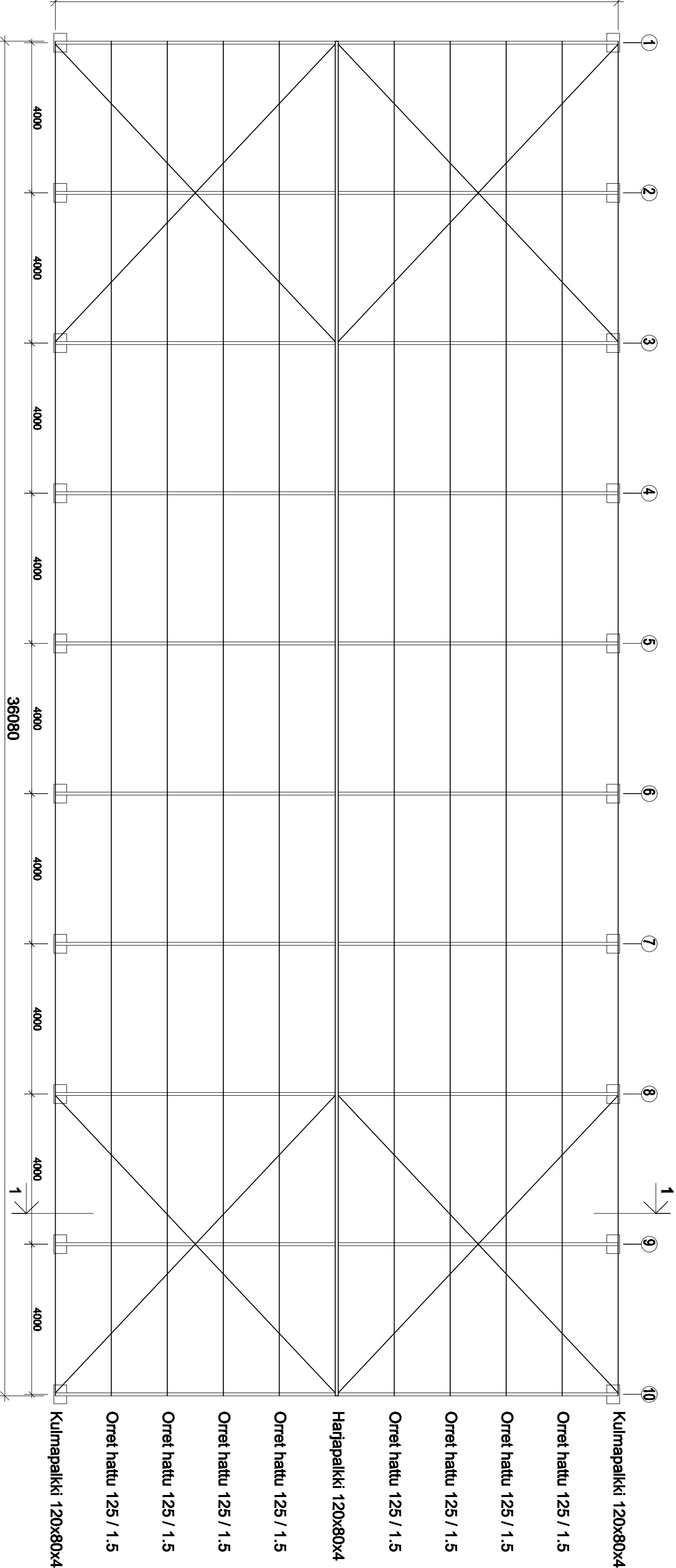


Poikileikkaus 1:100



- ① NP 70 x 70 x 3
② NP 80 x 80 x 3
③ NP 60 x 40 x 3

Kattopilivustus 1:100



Koosteytö	Kortti	Tontti/Pieno	Vierasmiesin arkkitehtitoimisto
Rakennuslupa UUDISRAKENNUS	Rakennuslupa	Rakennuslupa	Rakennuslupa
Rakennuslupa	Rakennuslupa	Rakennuslupa	Rakennuslupa
DESTIA	DESTIA	DESTIA	DESTIA
Pvc-pinoiteinen teräskaanthalli 15x36x5.5	Pvc-pinoiteinen teräskaanthalli 15x36x5.5	Pvc-pinoiteinen teräskaanthalli 15x36x5.5	Pvc-pinoiteinen teräskaanthalli 15x36x5.5
Forssa	Forssa	Forssa	Forssa
JANUS OY	JANUS OY	JANUS OY	JANUS OY
PL 110, 18101 HEINOLA, Janus@janus.fi, www.janus.fi Puh. (09) 714 4727, Gsm. 0400 673 861, Fax (09) 714 4738	PL 110, 18101 HEINOLA, Janus@janus.fi, www.janus.fi Puh. (09) 714 4727, Gsm. 0400 673 861, Fax (09) 714 4738	PL 110, 18101 HEINOLA, Janus@janus.fi, www.janus.fi Puh. (09) 714 4727, Gsm. 0400 673 861, Fax (09) 714 4738	PL 110, 18101 HEINOLA, Janus@janus.fi, www.janus.fi Puh. (09) 714 4727, Gsm. 0400 673 861, Fax (09) 714 4738
Päiväys 27.8.2009	Tekijä Heimo 111	Piir. 111	Piir. 111
RAK	RAK	RAK	RAK
1	1	1	1